



TESIS II DE MAESTRÍA

INGENIERÍA CIVIL

SOLUCIÓN DE ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE EN ZONAS RURALES DISPERSAS A PARTIR DE LA COSECHA DE AGUAS LLUVIAS EN EL DEPARTAMENTO DEL CHOCÓ – COLOMBIA. CASO DE ESTUDIO: QUIBDÓ E ISTMINA

PRESENTADO POR:

AMAN ALEXANDER ASPRILLA GAMBOA

ASESOR: JUAN SALDARRIAGA VALDERRAMA

*Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados - CIACUA, Departamento
de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia*



**UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL
MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ D.C.
2025**



Contenido

1. INTRODUCCIÓN.....	11	
2. OBJETIVOS.....	13	
2.1. Objetivo general.....	13	
2.2. Objetivos específicos	13	
3. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.....	14	
3.1. Zona rural.....	16	
3.1.1. Zona Rural Colombia	16	
3.1.2. Zona rural dispersa	18	
3.1.3. Zona rural dispersa departamento del Chocó	18	
3.2. Cobertura de abastecimiento de agua potable en Colombia.....	19	
3.2.1. Cobertura de abastecimiento de agua potable en el departamento del Chocó	22	
3.3. Antecedentes	23	
3.3.1. Antecedentes: Sistemas diferenciales de abastecimiento de agua potable y	tiramiento individual de agua para consumo humano.	23
3.3.2. Antecedentes: Experiencias mundiales	30	
3.4. Objetivo de Desarrollo Sostenible en Colombia.....	33	
4. DEPARTAMENTO DE CHOCÓ – COLOMBIA.....	35	
4.1. Descripción general del departamento del Chocó	35	
4.1.1. Demografía y población	37	
4.2. Importancia del Chocó como área de estudio.....	38	
4.3. Condiciones climáticas del departamento del Chocó	39	
4.3.1. Clima general.....	39	
4.3.2. Características de la pluviosidad	40	
5. DEMANDA DE AGUA.....	44	
5.1. Demanda de agua según Organización Mundial de la Salud.....	44	
5.2. Demanda de agua Para Colombia.....	44	
5.2.1. Resolución 0330 de 2017	44	
5.2.2. Resolución 844 de 2018	45	
5.2.3. Reglamento Técnico Del Sector Agua Potable Y Saneamiento Básico -	RAS, Título J.....	45



6.	TRATAMIENTO Y DESINFECCIÓN DE AGUA PARA CONSUMO HUMANO	46
6.1.	Sistemas de Tratamiento de Agua para Uso Individual en Comunidades Rurales	47
6.2.	Tratamiento de agua para zonas rurales dispersas	52
7.	SISTEMA DE RECOLECCIÓN DE AGUAS LLUVIAS	57
7.1.	Componentes	58
7.1.1.	Captación	58
7.1.2.	Conducción y recolección	60
7.1.3.	Interceptor de primeras lavado	61
7.1.4.	Almacenamiento	63
7.1.5.	Tratamiento.....	65
7.2.	Parámetros de diseño	65
7.2.1.	Factor técnico	65
7.2.2.	Factor económico	65
7.2.3.	Factor social.....	66
7.3.	Costos.....	66
7.3.1.	Costos de implementación (C_i)	67
7.3.2.	Costos de operación (CO).....	69
7.3.3.	Costos de mantenimiento (MC).....	70
8.	NORMATIVA Y REGULACIONES APLICABLES AL ABASTECIMIENTO DE AGUA LLUVIAS	72
8.1.	Normatividad a nivel mundial	72
8.2.	Colombia.....	72
8.3.	Calidad de agua potable	76
9.	CASOS DE ESTUDIO	77
9.1.	Descripción de vivienda tipo: Vivienda de interés social rural	77
9.2.	Metodología	81
9.2.1.	Datos de Precipitación	82
9.2.2.	Procesamiento de información meteorológica	83
	Valores atípicos	83
	Valores faltantes	84



9.2.3. Criterios de diseño	84
Procedimiento de diseño.....	85
Precipitación Promedio mensual	87
9.3. Diseño del Sistema.....	90
9.3.1. Escenario 1: Diseño de Sistema de Cosecha de Aguas Lluvias para Vivienda Rural Nueva	90
9.3.2. Escenario 2: Adaptación de Sistema de Cosecha de Aguas Lluvias para Vivienda Rural Existente.....	92
9.4. Resultado Caso de estudio en Istmina – Chocó.....	94
9.4.1. Precipitación Istmina	94
Escenario 2: Adaptación de Sistema de Cosecha de Aguas Lluvias para Vivienda Rural Existente – caso de estudio Istmina – Chocó.....	109
9.5.1. Precipitación Quibdó – Chocó.....	115
10. CONCLUSIONES.....	129
11. RECOMENDACIONES	132
12. BIBLIOGRAFIA	133



Ilustración 1 Zona rural Colombina - DNP 2000.	17
Ilustración 2. Cobertura de acueducto con sistemas convencionales.....	20
Ilustración 3. Número de municipios por rango de coberturas mediante sistemas a nivel urbano - Acueducto.....	21
Ilustración 4. Número de municipios por rango de coberturas mediante sistemas a nivel rural - Acueducto	21
Ilustración 5. Cobertura de acueducto (REC). DNP - 2024.....	22
Ilustración 6. Indicadores asociados a metas ODS con las cuales tiene compromisos el IDEAM a través de la subdirección de Hidrología. (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), 2023)	34
Ilustración 7. Mapa cartografía oficial del IGAC. (2017)	36
Ilustración 8. Cobertura de acueducto (REC). DNP.	38
Ilustración 9. Precipitación Media Total Anual Promedio Multianual 1981 - 2010 - IDEAM 2014	41
Ilustración 10. Mapa Precipitación anual del Departamento del Chocó - IDEAM	43
Ilustración 11. Filtro cerámico purificador de agua (fuente: alfa)	48
Ilustración 12. Unidad de Filtración de Agua a nivel domiciliario - Universidad Mayor de San Simón Bolivia	49
Ilustración 13. agua potable mediante el proceso SODIS - Meera & at 2008	50
Ilustración 14. Filtro de carbón activado	51
Ilustración 15. filtro multicapa	51
Ilustración 16. filtro de osmosis inversa y luz ultravioleta (fuente: evans)	52
Ilustración 17. Criterios de ponderación selección de alternativa zona de estudio.....	53
Ilustración 18. Matriz multicriterio selección sistema de tratamiento zona rural dispersa	54
Ilustración 19. Sistema de captación de agua lluvias (Organización Panamericana de la Salud, 2004)	57
Ilustración 20. Área efectiva de techo (Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México (Sedema), 2020).....	59
Ilustración 21. Tipos de canaletas (imagen de referencia) fuente: Rain Gutters solution	60
Ilustración 22. Canaletas con malla para evitar la contaminación por hojas (Hernandez Martínez, 2019).60	
Ilustración 23. Canaleta con rejilla y válvula para el lavado para las primeras lluvias (Hernandez Martínez, 2019).	61
Ilustración 24. Interceptor de Primeras Aguas (Organización Panamericana de la Salud, 2004).	62
Ilustración 25. tanque construido en concreto	64
Ilustración 26. tanque de almacenamiento plástico de prefabricado tipo botella (Pavco Wavin).....	64
Ilustración 27. Planta Tipología “T” VRST - Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio (2021).	78
Ilustración 28. Isometría Tipología en “T” VRST - Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio (2021). 78	



Ilustración 29. Vivienda de Interés Social Rural – (fuente: https://minvivienda.gov.co/vivienda-de-interes-social-sgr/vivienda-de-interes-social-rural)	79
Ilustración 30. Corte Transversal vivienda modificada - fuente propia 2024 (REVIT)	80
Ilustración 31. Isometría vivienda modificada - fuente propia 2024 (REVIT).....	80
Ilustración 32. Planta arquitectónica Tipología en “T” VRST	81
Ilustración 33. Representación puntaje Z. (Avellaneda Franco, 2020).....	83
Ilustración 34. área de cubierta - Vivienda de interés Social Rural (Departamento Nacional de Planeación (DNP), 2017)	85
Ilustración 35. Diagrama de flujo para el diseño del sistema de cosecha de aguas lluvias en una vivienda nueva - Elaboración propia.....	91
Ilustración 36. Diagrama de flujo para el diseño del sistema de cosecha de aguas lluvias en una vivienda existente- Elaboración propia.	93



Tabla 1. Categoría de Ruralidad - DDRS-DNP en el marco de la Misión para la Transformación del Campo (2014).....	17
Tabla 2. Revisión bibliográfica. Prototipo de cosecha inteligente de agua lluvia para mejorar la eficiencia energética residencial en Bogotá - Universidad Distrital.....	23
Tabla 3. Revisión bibliográfica. Rainwater Harvesting and Treatment: State of the Art and Perspectives	24
Tabla 4. Revisión bibliográfica. Analysis and Comparison of Sustainable Water Filters	25
Tabla 5. Revisión bibliográfica. Rainwater harvesting systems for urban developments - IWA publishing 2015	26
Tabla 6. Revisión bibliográfica. A Comparative Analysis of Rainwater Harvesting System and Conventional Sources of Water - Abdul Salam Khan 2023	26
Tabla 7. Revisión bibliográfica. Sustainability of rainwater catchment systems for small island communities - 2018	28
Tabla 8. Revisión bibliográfica. Pollutant Removal Efficiency in a Rainwater Treatment System in Roztocze National Park (Poland).....	29
Tabla 9. Contexto mundial de la utilización de tecnologías de aguas lluvias.....	32
Tabla 10. población departamento del Chocó por subregión 2024. (Plan de desarrollo departamento de Chocó 2024 - 2027)	37
Tabla 11. Dotación neta máxima por habitante (Res 0330 de 2017 - Art 43)	44
Tabla 12. Demandas de agua de acuerdo con lo estipulado en el RAS- Rural (Avellaneda Franco, 2020)	45
Tabla 13. Análisis de resultado evaluación multicriterio	56
Tabla 14. Volumen de separación óptimo (Moreno Lozano, 2020)	62
Tabla 15. Normatividad: Visión Mundial.....	72
Tabla 16. Normatividad en materia de abastecimiento y aguas lluvias: Colombia	73
Tabla 17. Características fisicoquímicas del agua para consumo humano (Avellaneda Franco, 2020)	76
Tabla 18. Área Tipología VRST- Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio (2021).....	79
Tabla 19. Especificaciones técnicas vivienda parámetro de la investigación.....	81
Tabla 20. Estaciones Climatológicas empleadas - IDEAM 2024.....	82
Tabla 21. Descripción de nivel de aprobación.....	82
Tabla 22. Coeficiente de escorrentía para diferentes materiales (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010).....	86
Tabla 23. Dotación neta máxima por habitante según la altura sobre el nivel del mar de la zona atendida - RES 0330 de 2017	87
Tabla 24. Resumen de los parámetros pluviométricos para el municipio de Istmina (2004-2024) - elaboración propia	95
Tabla 25. Precipitación promedio mensual y días de lluvia - Quibdó.....	95
Tabla 26. Resultados Escenario 1. Istmina - Precipitación promedio.	98
Tabla 27. Resultados escenario 1. Istmina - precipitación del año más lluvioso (2022)	100



Tabla 28. Resultados escenario 1. Istmina - precipitación del año más seco (2015)	102
Tabla 29. Resultados escenario 1. Istmina - precipitación del año con más días de lluvia (2005)	104
Tabla 30. Resultados escenario 1. Istmina - precipitación del año con menos días de lluvia (2020)	107
Tabla 31. Resultados escenario 2. Istmina - precipitación del año más seco (2015)	109
Tabla 32. Resultados escenario 2. Istmina - precipitación del año con menos días de lluvia (2020)	112
Tabla 33. Resumen de los parámetros pluviométricos para el municipio de Quibdó (2004-2024) - elaboración propia	115
Tabla 34. Precipitación promedio mensual y días de lluvia - Istmina	116
Tabla 35. Resultados escenario 1. Quibdó con 2.5m ³ - precipitación del año más seco (2016)	118
Tabla 36. Resultados escenario 1. Quibdó - precipitación del año con menor número de días lluviosos (2023)	120
Tabla 37. Resultados escenario 2. Quibdó con 4m ³ - precipitación del año más seco (2016)	122
Tabla 38. Resultados escenario 2. Quibdó con 2.5m ³ - precipitación del año más seco (2016)	123
Tabla 39. Resultados escenario 2. Quibdó con 3m ³ - precipitación del año con menor número de días lluviosos (2023)	125
Tabla 40. Resultados escenario 2. Quibdó con 2.5m ³ - precipitación del año con menor número de días lluviosos (2023)	126



Ecuación 1 Indicador de Cobertura de servicio públicos	19
Ecuación 2. Costo inicial sistema de recolección.	67
Ecuación 3. Costo inicial sistema de pretratamiento.	68
Ecuación 4. Costo implementación de almacenamiento (in Situ).	68
Ecuación 5. Costo implementación de almacenamiento (prefabricado)	68
Ecuación 6. Costo de implementación del sistema de recolección de aguas lluvias.	68
Ecuación 7. Costo de consumo energético de la bomba.....	69
Ecuación 8. Costo desinfección.....	69
Ecuación 9. Costo de operación del sistema de recolección de aguas lluvias	70
Ecuación 10. Costo de mantenimiento sistemas de pretratamiento	70
Ecuación 11. Costo de inspección	71
Ecuación 12. Costo de Limpieza	71
Ecuación 13. Estimación precipitación promedio diaria	86
Ecuación 14. Estimación precipitación promedio diaria para 29 de febrero.	87
Ecuación 15. Estimación precipitación promedio mensual	87
Ecuación 16. Determinación de la demanda.....	88
Ecuación 17. Determinación de la oferta diaria.....	89
Ecuación 18. Determinación de la oferta mensual	89



Gráfico 1. Precipitación Anual en el Municipio de Istmina (2004-2024) – comparación.....	96
Gráfico 2. Precipitación promedio mensual y días de lluvia - Istmina	96
Gráfico 3. Nivel del Tanque (m ³) - precipitación promedio diaria.	99
Gráfico 4. Nivel del Tanque (m ³) - precipitación año más lluvioso (2022).....	101
Gráfico 5. Nivel del Tanque (m ³) - precipitación año más seco (2015)	103
Gráfico 6. Nivel del Tanque (m ³) - precipitación año con más días de lluvia (2005).....	106
Gráfico 7. Nivel del Tanque (m ³) - precipitación año con menos días de lluvia (2020).....	108
Gráfico 8. Nivel del Tanque de 5m ³ - precipitación año más seco (2015)	111
Gráfico 9. Nivel del Tanque de 2.5m ³ - precipitación año más seco (2015)	111
Gráfico 10. Nivel del Tanque de 5m ³ - precipitación del año con menos días de lluvia (2020).....	113
Gráfico 11. Nivel del Tanque de 2.5m ³ - precipitación del año con menos días de lluvia (2020).....	114
Gráfico 12. Precipitación anual en el municipio de Quibdó (2004-2020) -comparación	116
Gráfico 13. Precipitación promedio mensual y días de lluvia - Quibdó (2004-2024)	117
Gráfico 14. Nivel de Tanque 2.5m ³ - Quibdó - año 2016.....	119
Gráfico 15. Nivel de Tanque 2.5m ³ - Quibdó - año 2023.....	121
Gráfico 16. Nivel de Tanque 2.5m ³ - Quibdó - año 2016.....	124
Gráfico 17. Nivel de Tanque 2.5m ³ - Quibdó - año 2016.....	124
Gráfico 18. Nivel de Tanque 3m ³ - Quibdó - año 2023.....	127
Gráfico 19. Nivel de Tanque 2.5m ³ - Quibdó - año 2023.....	128



1. INTRODUCCIÓN

El acceso al agua potable es un derecho humano fundamental reconocido por la Organización de las Naciones Unidas (ONU) y es esencial para la salud, el bienestar y el desarrollo sostenible de las comunidades en todo el mundo. Colombia no es la excepción, mediante la Sentencia T-740/11 de la corte constitucional “El agua se considera como un derecho fundamental y, se define, de acuerdo con lo establecido por el Comité de Derechos Económicos, Sociales y Culturales, como “el derecho de todos de disponer de agua suficiente, salubre, aceptable, accesible y asequible para el uso personal o doméstico” (Corte Constitucional de Colombia, 2011). A pesar de esto, en muchas zonas rurales dispersas de Colombia, el acceso al agua potable es limitado debido a la falta de infraestructuras adecuadas de abastecimiento y tratamiento de agua.

En Colombia existen Políticas públicas que trabajan en miras de garantizar el servicio y ampliar la cobertura en la ruralidad (Departamento Nacional de Planeación (DNP), 2017) a menudo se requiere de un mayor enfoque en la implementación de soluciones sostenibles para garantizar la cantidad y la calidad para satisfacer las necesidades de agua potable de las comunidades rurales dispersas.

El departamento del Chocó, a pesar de su extraordinario potencial hídrico, presenta los índices más bajos de cobertura en abastecimiento de agua potable, una problemática que se agrava especialmente en las zonas rurales dispersas. Resulta paradójico que una región reconocida como la más rica en ríos y con la mayor pluviometría no solo de Colombia, sino también de las más altas a nivel mundial, enfrente esta situación. Este escenario refleja un evidente abandono por parte del gobierno nacional y la ausencia de políticas públicas efectivas para reducir las brechas de desigualdad y mejorar la competitividad de la región.

La escasez de acceso a agua potable constituye un desafío crítico a nivel mundial, afectando de manera significativa a comunidades en zonas rurales dispersas, donde las condiciones climáticas y geográficas adversas agravan la problemática. En el contexto colombiano, el departamento del Chocó se presenta como un ejemplo emblemático de estas dificultades, caracterizado por su alta precipitación y la consiguiente necesidad de encontrar soluciones innovadoras y sostenibles para mejorar los indicadores en el suministro de agua potable, porque en los indicadores se ocupa los últimos puestos a nivel país, solamente antes de Vichada y Vaupés. En este sentido, la cosecha de agua de lluvia emerge como una opción prometedora, aprovechando las condiciones naturales del entorno. Este documento aborda la exploración y evaluación de la viabilidad y aplicabilidad de la cosecha de agua de lluvia como una medida efectiva para mejorar el acceso al agua potable en zonas rurales dispersas de alta precipitación, considerando aspectos climáticos, tecnológicos y normativos.



Este estudio contribuye al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible, especialmente en relación con el acceso universal al agua potable y la gestión sostenible de los recursos hídricos. Con ello, se busca no solo mejorar las condiciones de vida de las comunidades rurales del Chocó, sino también generar conocimientos aplicables a otras regiones con retos similares en Colombia y América Latina.

Este documento busca explorar a fondo la implementación de sistemas de cosecha de aguas lluvias en lugares donde las condiciones climatológicas lo permitan como el departamento del Chocó, con un enfoque específico en zonas rurales dispersas.

Además de evaluar la viabilidad técnica y económica de esta alternativa en los municipios de Quibdó e Istmina, a través de una metodología que integra el análisis de las condiciones climáticas locales, la evaluación de tecnologías disponibles y el diseño de sistemas adaptados a contextos específicos, este estudio busca ofrecer soluciones aplicables y sostenibles para las comunidades rurales dispersas de la región. Asimismo, se analizarán las regulaciones y normativas existentes en relación con la cosecha de agua en un contexto global y nacional.

Esta investigación aborda también las implicaciones sociales y culturales de estas tecnologías, considerando la importancia de involucrar a las comunidades en el diseño, implementación y mantenimiento de los sistemas. Además, se hace un énfasis en el marco normativo colombiano, identificando oportunidades y barreras para la adopción de este tipo de soluciones. Al vincular el análisis técnico con una perspectiva integral, la investigación no solo propone sistemas eficaces desde el punto de vista operativo, sino también adaptados a las realidades socioeconómicas del Chocó.

El análisis de los escenarios específicos de Quibdó e Istmina, mediante la consideración detallada de datos pluviométricos y condiciones socioeconómicas, permitirá generar percepciones valiosas sobre la efectividad de la cosecha de agua de lluvia en estas áreas. Además, se abordará la necesidad de considerar soluciones complementarias para garantizar la sostenibilidad a largo plazo, reconociendo la variabilidad climática y la posible insuficiencia de la cosecha de agua de lluvia en momentos específicos.



2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo general

Identificar soluciones para mejorar el acceso al agua potable en zonas rurales dispersas con alta precipitación, analizando la viabilidad y aplicabilidad de la cosecha de agua de lluvia, considerando criterios técnicos y normativos aplicables. Caso de estudio: municipios de Istmina y Quibdó, en el departamento del Chocó.

2.2. Objetivos específicos

- Evaluar las condiciones climáticas de las zonas rurales en estudio para identificar áreas con potencial óptimo para la cosecha de agua de lluvia como fuente de abastecimiento de agua potable.
- Analizar detalladamente las tecnologías y sistemas de cosecha de agua de lluvia, evaluando su adecuación para zonas rurales con alta precipitación, considerando eficiencia técnica, viabilidad económica y sostenibilidad.
- Investigar las regulaciones y normativas aplicables a la cosecha de agua de lluvia, identificando marcos legales y criterios técnicos relevantes en términos de calidad y cantidad de agua.
- Desarrollar una metodología para diseñar sistemas de cosecha de agua de lluvia en escenarios teóricos, considerando la diversidad climática y el comportamiento de estos sistemas en entornos específicos.



3. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

El mundo en la actualidad se enfrenta a una crisis de agua, según el Banco Interamericano de Desarrollo (BID) uno de cada nueve personas no tiene accesos a agua potable, y se prevé que el 25 por ciento de la población mundial sufrirá de episodios recurrentes de escasez de agua para 2025, en Latino América y el Caribe aproximadamente 230 millones de humanos tiene problemas de insuficiencia de agua, lo que pone en riesgo la salud pública y la seguridad en las comunidades, toda vez que el suministro de agua suficiente propende buenas prácticas de higiene y disminución de enfermedades de transmisión hídrica (Banco Interamericano de Desarrollo (BID), 2019). La Organización Mundial De La Salud (OMS), estima que el 80% de las personas sin acceso a agua potable viven en zonas rurales.

En 2010 y 2015, la Asamblea General de las Naciones Unidas y el concejo de Derechos Humanos reconocieron explícitamente el derecho humano al abastecimiento de agua y al saneamiento. Todas las personas tienen derecho a disponer de forma continuada de cantidades suficientes de agua salubre, físicamente accesible, asequible y de una calidad aceptable para el uso personal y doméstico (Organización Mundial de la Salud (OMS), 2023).

Ocho de cada 10 personas que carecían de acceso a servicios básicos de abastecimiento de agua vivían en zonas rurales. Por otra parte, los servicios de saneamiento gestionados de manera segura llegaron a un 62% de la población urbana mundial, pero solo a un 44% de la población rural. (Organización Mundial de la Salud (OMS), 2021). De esta manera, las zonas rurales dispersas tienen deficiente acceso a fuentes seguras, confiables y abundantes de agua, esto se debe a diversos factores asociados a la lejanía con fuentes de agua, inexistencia de infraestructura adecuado para la distribución de agua, contaminación de fuentes hídricas disponibles, la variabilidad espacial debido a condiciones climáticas o factores antrópicos, entre otros factores que influyen con la problemática de accesibilidad.

Las comunidades rurales dispersas por la dificultad de accesibilidad presentan una serie de desafíos que incluyen:

- *Distancia redes de abastecimiento de agua potable existentes:* las viviendas rurales dispersas se encuentran por lo general alejadas de manera considerable de las redes principales de acueducto con agua potable, lo que implica costos significativos económicamente para acceder a estas fuentes, para los prestadores de servicio llevar el bien hasta este tipo de vivienda puede resultar no rentable; esta situación afecta de manera considerable la calidad de vida de las personas que habitan estas viviendas, teniendo en cuenta que el agua es un bien vital.



- *Contaminación del agua:* En muchas áreas rurales, muchas de las fuentes de abastecimiento de agua superficial se encuentran contaminadas porque en muchas ocasiones se encuentran aguas debajo de áreas urbanas que las contaminan. La contaminación del recurso puede ser con patógenos, químicos o metales pesados, lo que pone en riesgo la salud de la población que depende de estas fuentes; en consecuencia, instalar sistemas de tratamiento de agua para soluciones individuales resulta ser demasiado costoso.
- *Falta de infraestructura:* Las zonas rurales dispersas generalmente tienen deficiencia o inexistencia de infraestructura que tenga la capacidad de almacenar o distribuir agua de manera constante y de calidad confiable.

Así las cosas, la implementación de tecnologías para la gestión del agua para el sector rural se convierte en una alternativa de solución muy viable.

La implementación de sistemas de cosecha de aguas lluvias se convierte en una solución relevante en zonas donde las condiciones sean adecuadas para su uso. Estos sistemas capturan y almacenan agua de lluvia que, de no ser así, se perdería, permitiendo a las comunidades rurales que tengan las condiciones de disponer de una fuente de agua, que no sea excluyente de otros sistemas como aljibes, pilas comunales, captación de agua de niebla entre otros. Algunos de los beneficios de estos sistemas incluyen:

- ✓ Autosuficiencia en la gestión del recurso donde la precipitación tenga la capacidad en tanto en cantidad como en frecuencia de lluvias, para superar la demanda.
- ✓ Reducción de la dependencia de fuentes de agua externas.
- ✓ Mejora en la seguridad alimentaria y la salud al disminuir la exposición a aguas contaminadas
- ✓ Por otro lado, se puede mitigar los efectos de la variabilidad climática.
- ✓ Mayor autonomía y resiliencia de las comunidades rurales.

Sin embargo, la implementación exitosa de sistemas de cosecha de aguas pluviales también conlleva desafíos, como la capacitación de la comunidad, la selección adecuada de tecnologías y la gestión sostenible de los recursos hídricos. Por lo tanto, la investigación en este campo es esencial para comprender mejor cómo adaptar y aplicar estas soluciones de manera efectiva en zonas rurales dispersas, entendiendo que son las áreas en donde menor cobertura de abastecimiento se presenta de acuerdo con datos publicados por el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE).



En zonas rurales dispersas, el acceso a fuentes de aguas seguras y confiables a menudo es limitado o inexistente. Esto se debe a diversos factores, como la lejanía de las fuentes de agua tratada, la falta de infraestructura adecuada para la distribución de agua, la contaminación de fuentes de agua existentes y la variabilidad en la disponibilidad de agua debido a condiciones climáticas impredecibles.

3.1. Zona rural

Etimológicamente la palabra rural caracteriza lo rupestre y lo rústico. En ese sentido, se alude con ello a una condición atribuida a los espacios del campo que no presentan urbanización; por consiguiente, lo rural también se ha definido de modo dicotómico como todo aquello que no es urbano (Mora Villalobos, 2021). Según el sociólogo francés B. Kayser el espacio rural es «un conjunto territorial cuyas decisiones se le escapan y en el que existe un modo particular de utilización del espacio y de la vida social, caracterizado, en primer lugar, por una densidad relativamente débil de habitantes y de construcciones, lo que determina un predominio de los paisajes vegetales; en segundo lugar por un uso económico del suelo con predominio agro-silvo-pastoril; en tercer lugar por un modo de vida de sus habitantes marcado por su pertenencia a colectividades de tamaño limitado, en los que existe un estrecho conocimiento personal y fuertes lazos sociales y por su relación particular con el espacio, que favorece un entendimiento directo y vivencial del medio ecológico y, finalmente, por una identidad y una representación específica, muy relacionada con la cultura campesina» (Kayser, 1990). Concordante con la definición algo más simplificada de la Unión Europea, El espacio rural es un territorio donde se dan una serie de dinámicas y características concretas que se relacionan con la existencia de una escasa distribución de la población en un ámbito donde los espacios no construidos son la nota predominante. Asimismo, se caracteriza por la utilización de los suelos para la agricultura, la ganadería y la ocupación forestal (Cortes Samper, 2023).

En Conclusión, la zona rural se refiere a la zona que, más allá de la delimitación de un territorio ajeno a una zona urbana, también tiene unas dinámicas socio culturales y características económicas dedicadas a el uso del campo y de grandes áreas.

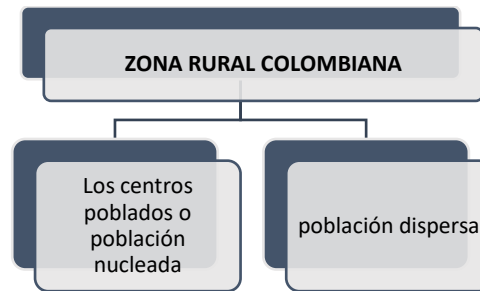
3.1.1. Zona Rural Colombia

Según el Departamento Nacional de Planeación (DNP) y el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE), se entiende como zona rural el espacio comprendido entre la cabecera municipal o perímetro urbano y el límite municipal. En la zona rural se distinguen dos clases de asentamientos como se puede ver en la Ilustración 1:

- Los centros poblados o población nucleada, concentrada en caseríos o conjuntos de por lo menos 20 viviendas separadas por paredes, muros, cercas o huertas
- Fincas y viviendas dispersas (población dispersa) separadas entre otros, por áreas cultivadas, prados, bosques, potreros, carreteras o caminos.



Ilustración 1 Zona rural Colombiana - DNP 2000.



Según el Artículo 33 de la Ley 388 del suelo rural se define como “los terrenos no aptos para el uso urbano, por razones de oportunidad, o por su destinación a usos agrícolas, ganaderos, forestales, de explotación de recursos naturales y actividades análogas” además teniendo en cuenta lo consignado den el Artículo 21 de la Ley 1469 de 2011 “los planes de ordenamiento territorial señalarán los límites físicos y las condiciones generales del uso de los suelos rurales que deban ser mantenidos y preservados por su destinación a usos agrícolas, ganaderos, forestales o de explotación de recursos naturales, teniendo en cuenta la necesidad del crecimiento urbano y la adecuada utilización agrológica de dichas zonas”.

La Dirección de Desarrollo Rural Sostenible del Departamento Nacional de Planeación a partir de la densidad poblacional, la relación de población en las cabeceras con la población que no se encuentra en ellas y la ruralidad dentro del Sistema de Ciudades, se establecieron tres categorías de ruralidad (Departamento de Planeación Nacional, 2014).

- Ciudades y aglomeraciones
- Intermedios
- Rural
- Rural disperso

Tabla 1. Categoría de Ruralidad - DDRS-DNP en el marco de la Misión para la Transformación del Campo (2014)

Densidad (hab/km ²)		Población en cabecera (miles)			
		Más de 100 (Ciudades y aglomeraciones)	25 a 100	Menos de 25	
				< 70 % población en zona resto	> 70 % población en zona resto
> 100	117	29	84	35	
50 - 100		19	132	91	
10 - 50		15	279	203	
0 - 10		3	54	61	

	Ciudades y aglomeraciones
	Intermedios
	Rural
	Rural disperso



Entonces, la zona rural corresponde a municipios que tienen cabecera municipal menor a 25 mil habitantes y presentan densidades poblacionales entre 10 y 100 habitantes por kilómetro cuadrado.

Sin embargo, “de acuerdo con la ley de ordenamiento territorial, los desarrollos de la población asentada en suelo rural que se han dado en el país pueden clasificarse de la siguiente forma” (Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico - Título J, 2021, pág. 13):

- Cabeceras de corregimientos,
- Centros poblados,
- Parcelaciones campestres,
- Núcleos de población,
- Viviendas dispersas.

3.1.2. Zona rural dispersa

Son aquellos municipios y áreas no municipalizadas (ANM) que tienen cabeceras pequeñas y densidad poblacional baja (menos de 50 hab/km²). 318 territorios son considerados en la categoría de “rural disperso” para el 2014, están asociados a una población rural de 3.658.702 y el área es del 64,9 % del total nacional (Departamento de Planeación Nacional, 2014).

La Población dispersa, está constituido por fincas y viviendas dispersas separadas, entre otros, por áreas cultivadas, prados, bosques, potreros, carreteras o caminos. Las zonas rurales de Colombia han vivido la reproducción de condiciones de pobreza y con mayor intensidad el conflicto armado interno a lo largo de su historia.

Colombia en 2014 tenía 1122 municipios de los cuales 373 son rural y 318 son rurales dispersos, sin embargo, en diciembre de 2023 es fundado el municipio de Nuevo Belén de Bajirá en el departamento del Chocó, el cual reúne las condiciones para ser rural disperso, es decir, Colombia cuenta con 320 municipios rurales dispersos.

3.1.3. Zona rural dispersa departamento del Chocó

El departamento de Chocó está conformado por 31 municipios, incluyendo el recién creado municipio Nuevo Belén de Bajirá (decreto 0284 del 26 de diciembre de 2023 y de la Ordenanza No. 180 del 27 de junio de 2023). (Departamento Nacional de Planeación, 2024). Según el último censo oficial del Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE), el departamento del Chocó cuenta con una población total aproximada de 605.478 habitantes. De esta población, el 50,7% reside en áreas rurales o centros poblados, lo que refleja la importancia de las zonas rurales en la composición demográfica del departamento (Departamento Nacional de Planeación , 2024)



3.2. Cobertura de abastecimiento de agua potable en Colombia

La prestación del servicio de abastecimiento de agua, se constituye como un gran reto que deben enfrentar las autoridades internacionales, nacionales y locales. Para Colombia particularmente es responsabilidad del gobierno nacional, departamental, y municipal la prestación adecuada del servicio, toda vez que esto tiene repercusiones directas en la salud de la población lo que repercute en un problema de índice económico y social. De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (OMS) las inversiones en agua y saneamiento generan beneficios económicos importantes, entre ellos, un aumento estimado del 1,5 % en el producto interno bruto (PIB) mundial y un retorno de US\$ 4,3 por cada dólar gastado en estos servicios, lo cual refleja la reducción de los costos sanitarios para las familias y el aumento de la productividad (Moreno Méndez, 2020).

De acuerdo con el artículo 5° de la Ley 142 de 1994, “es responsabilidad de los municipios y distritos garantizar la prestación efectiva de los servicios públicos de acueducto alcantarillado y aseo a todos los habitantes dentro de su jurisdicción, a través de las empresas de servicios públicos. Así mismo, también es responsabilidad del municipio la expedición de Instrumentos de Ordenamiento Territorial, como herramienta para la planeación y organización de su territorio, clasificándolo y delimitando el uso de su suelo, dentro del cual también se contempla la provisión de los servicios públicos de agua y saneamiento básico”.

Para saber de manera cualitativa el indicador de cobertura la Superintendencia De Servicios Públicos Domiciliarios de Colombia para los acueductos emplea la Ecuación 1 Indicador de Cobertura de servicio públicos.

Ecuación 1 Indicador de Cobertura de servicio públicos

$$\frac{\sum \text{Predios con acceso al servicio publico domiciliario}}{\sum \text{Total de predios residenciales}} * 100$$

A partir de la información reportada por parte de las alcaldías municipales en el SUI para la vigencia 2022, se observa que el 19.85% de municipios presentan una cobertura municipal de servicio público de acueducto superior al 90% (219 municipios del país), mientras que el 5.53% de los municipios del país presentaron coberturas inferiores al 15% (61 municipios). Por su parte, 61 municipios no reportan información al SUI o no reportan predios residenciales para el cálculo de coberturas, la distribución espacial de la cobertura de acueducto con sistemas convencionales de puede ver en la Ilustración 2. Cobertura de acueducto con sistemas convencionales (Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, 2022)

Las coberturas rurales, aunque presentan un comportamiento creciente en las últimas cuatro décadas, siguen siendo bajas y las diferencias con las zonas urbanas son de más de 20 puntos porcentuales, considerando, además, importantes diferencias entre regiones,



departamentos y en los mismos municipios. Como se puede ver de manera contrastante en las Ilustración 3 y la Ilustración 4 donde se puede evidenciar la diferencia entre las coberturas urbanas y rurales de manera significativa, teniendo más cobertura las zonas urbanas con rangos de cobertura de 90% al 100%, mientras que en zonas rurales 163 municipios se encuentran coberturas de acueducto menor o igual al 20% (Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, 2022).

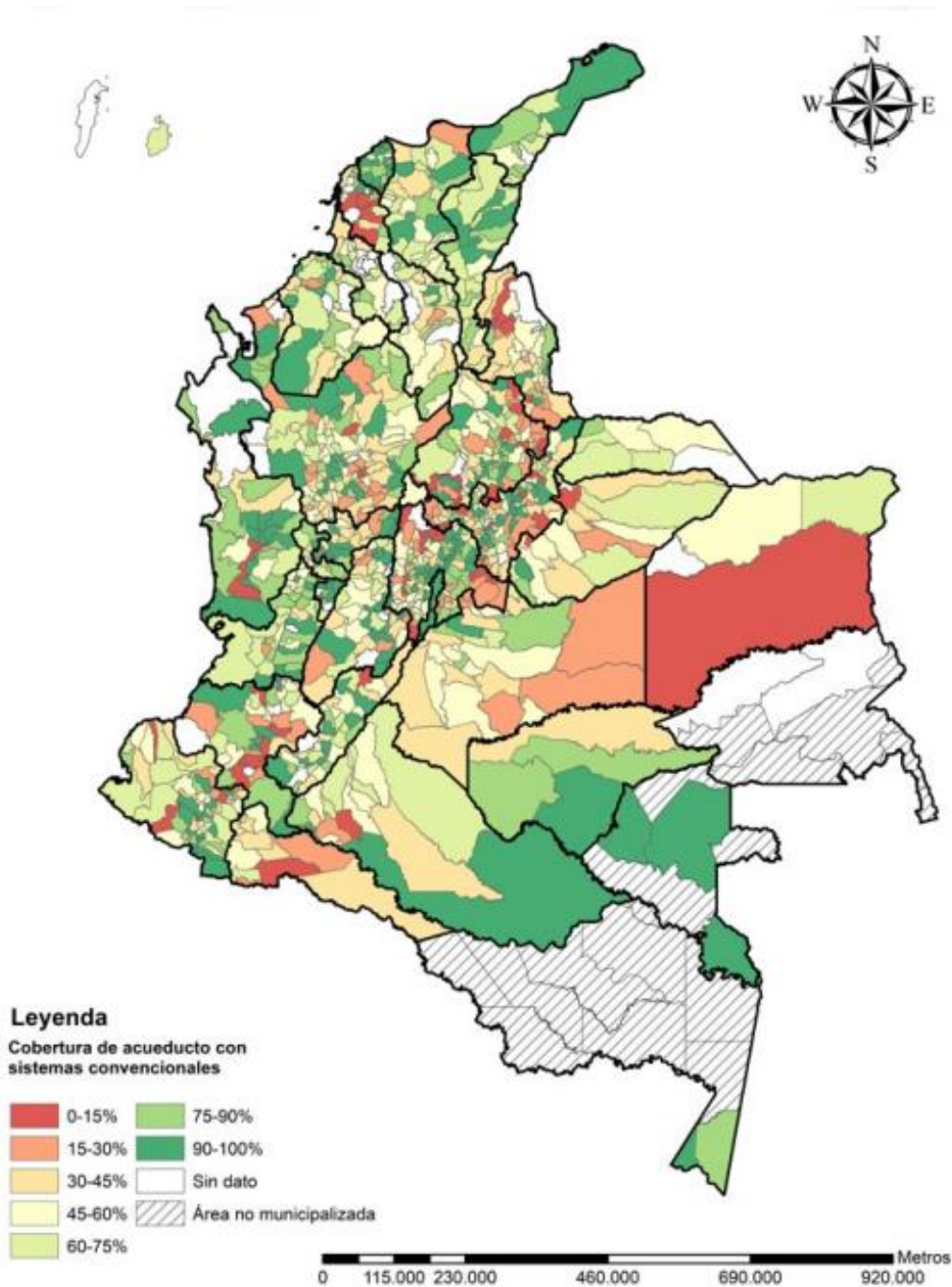


Ilustración 2. Cobertura de acueducto con sistemas convencionales



Ilustración 3. Número de municipios por rango de coberturas mediante sistemas a nivel urbano - Acueducto

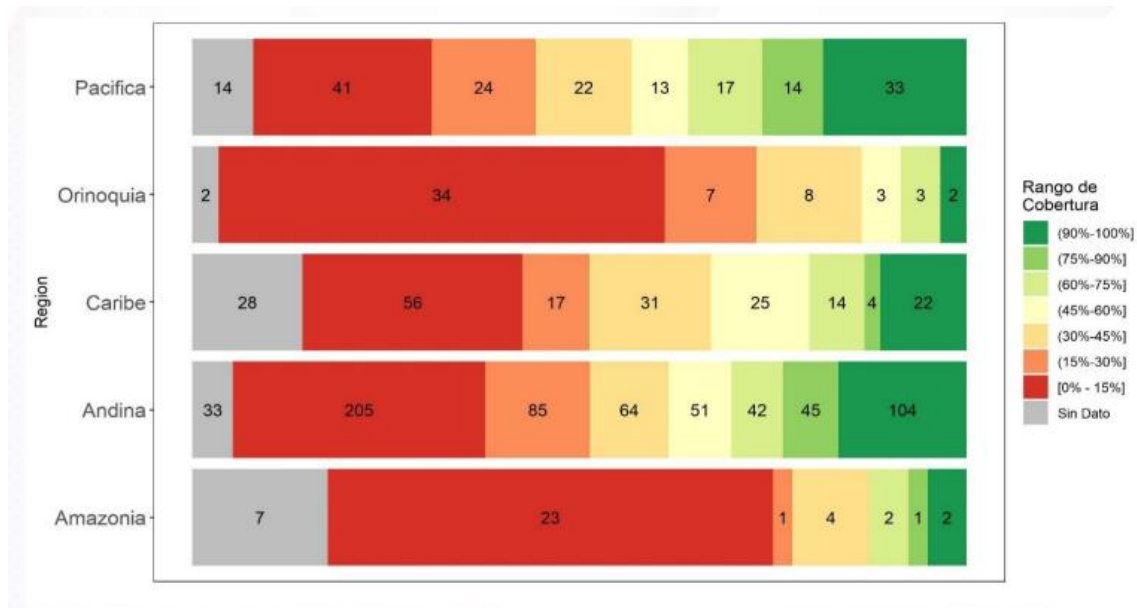


Ilustración 4. Número de municipios por rango de coberturas mediante sistemas a nivel rural - Acueducto

Según el comunicado de prensa sobre el censo poblacional de 2018 realizado por el DANE, Colombia tiene una cobertura media de 86.4% en donde la ciudad de Bogotá tiene la mayor cobertura (99.5%) y en contrastes los departamentos de Guainía y Chocó ocupan los últimos puestos con una cobertura de 21.9% y 28.5% respectivamente. (Departamento Administrativo Nacional de Estadística –DANE, 2018)



3.2.1. Cobertura de abastecimiento de agua potable en el departamento del Chocó

El acceso a servicios de acueducto y saneamiento básico es un factor determinante para el progreso social y el bienestar de la población. La provisión adecuada de estos servicios se considera un derecho esencial y un motor para reducir las desigualdades en las comunidades, especialmente en regiones vulnerables como el Chocó.

La cobertura de acueducto en 2024 alcanzó el 57.6% como se puede evidenciar en Ilustración 5, lo que representa un incremento de 4,2 puntos porcentuales respecto al año 2022 y un aumento de 13,8 puntos porcentuales en comparación con 2018. Estos avances reflejan un esfuerzo sostenido para mejorar el acceso a agua potable, aunque los desafíos persisten, especialmente en departamentos con alta ruralidad y población dispersa como el Chocó.



Cobertura de acueducto (REC)

Fuente: DNP a partir de información de la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios - 2022

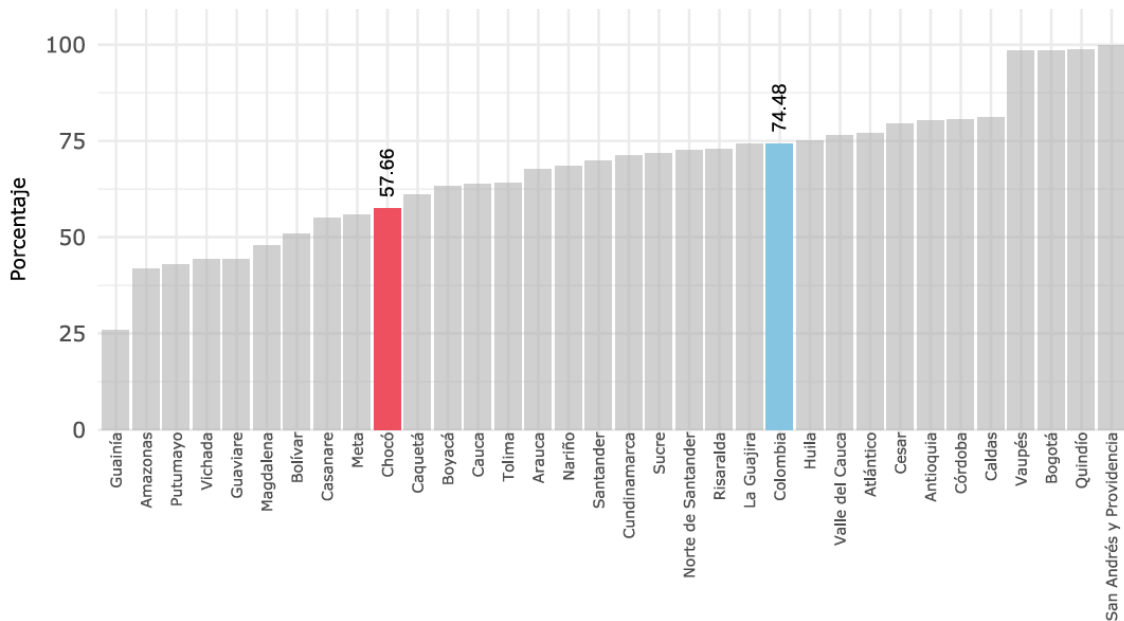


Ilustración 5. Cobertura de acueducto (REC). DNP - 2024

En el caso del Chocó, la cobertura de acueducto es una debilidad importante atribuible a su compleja geográfica, la dispersión de su población y las desigualdades históricas que se han presentado en el territorio. La mayoría de las zonas rurales carece de acceso continuo a agua potable, y las soluciones existentes suelen depender de fuentes locales como quebradas, ríos, pozos y las aguas lluvias, que no siempre cumplen con los estándares de calidad.



Además, el acceso desigual a servicios de agua potable refleja las brechas entre las áreas urbanas y rurales. Mientras que los centros poblados cuentan con mayores niveles de cobertura, encontrando Cabeceras municipales como la de Tadó y Carmen de Atrato que cuentan con cobertura de hasta el 100%, sin embargo, las zonas rurales dispersas del departamento tienen tasas significativamente más bajas, lo que afecta directamente la salud, la calidad de vida y el desarrollo de estas comunidades.

Según las entidades estatales Colombia ha mejorado significativamente los indicadores en materia de cobertura, pero, no necesariamente se traduce en un impacto homogéneo en regiones como el departamento del Chocó. Es importante destacar la necesidad de implementar estrategias diferenciales que consideren las características locales y promuevan soluciones adaptadas, que entidades como el Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio tienen tipificados a veces no se implementan de manera efectiva.

3.3. Antecedentes

3.3.1. Antecedentes: Sistemas diferenciales de abastecimiento de agua potable y tiramiento individual de agua para consumo humano.

Esta sección, tiene como objetivo explorar investigaciones previas relacionadas con esta práctica innovadora y cómo se ha aplicado en diversas partes del mundo. A través de una revisión crítica de la literatura existente, abordaremos los fundamentos, tecnologías y consideraciones clave que han rodeado la cosecha de agua de lluvia como una solución viable para el abastecimiento de agua potable en contextos rurales.

Se proporcionará una visión integral de la evolución y el estado actual de la cosecha de agua de lluvia como una estrategia efectiva para aprovechar un recurso natural abundante y a menudo desaprovechado. Se desarrolló explorando diferentes estudios, investigaciones, artículos y diferentes documentos científicos que desarrollen el tema y el potencial de la cosecha de agua de lluvia en las zonas rurales dispersas.

Tabla 2. Revisión bibliográfica. Prototipo de cosecha inteligente de agua lluvia para mejorar la eficiencia energética residencial en Bogotá - Universidad Distrital

Título	Prototipo de cosecha inteligente de agua lluvia para mejorar la eficiencia energética residencial en Bogotá
Autores	Carlos Arturo Ramírez Escobar Clara Inés Buriticá Arboleda
	Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Fecha	2021



Objetivo	Presentación de resultado de uso de prototipos de sistema de cosecha de aguas lluvias (SCALL) usado para sustitución parcial de agua potable en una vivienda unifamiliar de Bogotá (Colombia).
Método	El agua de lluvia como un recurso distribuido que puede sustituir al agua potable proporcionada por los servicios de abastecimiento centralizado de agua. Este método compara el rendimiento del servicio centralizado de agua potable con las mejoras en el rendimiento de un prototipo de recolección de agua de lluvia.
Cita	(Ramirez Escobar & Buriticá Arboleda, 2021). https://doi.org/10.14483/22487638.17975

Tabla 3. Revisión bibliográfica. *Rainwater Harvesting and Treatment: State of the Art and Perspectives*

Título	Rainwater Harvesting and Treatment: State of the Art and Perspectives
Autores	Anita Rainmondi Ruth Quinn Gopinathan Abhijith Gianfranco Becciu Avi Ostfeld Water
año	2023
resumen	Este artículo revisa el estado del arte en recolección, tratamiento y gestión del agua de lluvia, destacando sus beneficios ambientales y sociales y su contribución a los Objetivos de Desarrollo Sostenible. Incluye metodologías para diseñar sistemas de recolección de agua de lluvia y analiza tecnologías avanzadas de tratamiento, tanto fisicoquímicas como biológicas. Se resalta que la cosecha de agua de lluvia (RWH, por sus siglas en inglés) es una práctica factible a nivel local, aunque limitada por las superficies de captación. Su implementación en áreas urbanas puede cumplir múltiples objetivos de gestión hídrica. Las principales variables que afectan el diseño y desempeño de los sistemas RWH son el régimen de lluvias, el área y tipo de superficie de captación, y la demanda de agua, además de factores



	<p>hidrológicos como el volumen y la duración de las lluvias, el tiempo entre eventos y la frecuencia de los mismos.</p> <p>El análisis sugiere que, para modelar sistemas RWH, es preferible utilizar datos de resolución temporal baja (diaria o subdiaria) debido a la alta variabilidad de las entradas. Comparado con aguas superficiales y subterráneas, el agua de lluvia tiene pH casi neutro, carece de dureza y no contiene subproductos de desinfección. Sin embargo, puede presentar contaminantes como carbono orgánico total (TOC), nitratos (NO₃⁻) y sulfatos (SO₄²⁻), provenientes de excrementos de aves y roedores, líquenes y otras deposiciones en las superficies de escorrentía..</p>
Cita	Raimondi, A.; Quinn, R.; Abhijith, G.R.; Becciu, G.; Ostfeld, A. Rainwater Harvesting and Treatment: State of the Art and Perspectives. Water 2023, 15, 1518.

Tabla 4. Revisión bibliográfica. Analysis and Comparison of Sustainable Water Filters

Título	Analysis and Comparison of Sustainable Water Filters
Autores	Skye McAllister
	University of Wisconsin
año	2005
resumen	En 2001, las Naciones Unidas declararon el acceso al agua limpia como un derecho humano básico y fijaron como meta reducir a la mitad la cantidad de personas sin acceso a agua potable y saneamiento para 2015. Este informe tiene como objetivo investigar tecnologías sostenibles de filtración de agua, establecer directrices para su desarrollo y recomendar las soluciones más efectivas para alcanzar este objetivo. En particular, se analizaron cinco alternativas: filtros de cerámica impregnados con plata, filtros de sedimentos con óxido de hierro, microfiltros de malla plástica, filtros de carbón activado y pasteurizadores solares.
Cita	McAllister, S. (2005). Analysis and comparison of sustainable water filters. Department of Mechanical Engineering, University of Wisconsin – Madison.



Tabla 5. Revisión bibliográfica. Rainwater harvesting systems for urban developments - IWA publishing 2015

Título	Rainwater harvesting systems for urban developments
Autores	Stephen Cook Ashok K. Sharma Ted Gardner IWA Publishing - International Water Association Publications
año	2015
resumen	Los sistemas de recolección de agua de lluvia han sido utilizados como fuente local de suministro de agua desde los primeros asentamientos humanos. En tiempos recientes, los sistemas de recolección de agua de lluvia se han convertido en una fuente importante de suministro de agua en áreas rurales y remotas donde no están disponibles los sistemas de suministro de agua reticulados. El agua de lluvia recolectada también puede proporcionar una fuente de agua potable "mejorada" en áreas rurales y periurbanas de países en desarrollo, donde el agua superficial puede estar contaminada por patógenos y/o el agua subterránea de buena calidad no está fácilmente disponible.
Cita	Cook, S., Sharma, A. K., & Gardner, T. (2015). Rainwater harvesting systems for urban developments. In Rainwater Tank Systems for Urban Water Supply (pp. 1-17). IWA Publishing. (Rainwater harvesting systems for urban developments, 2015)

Tabla 6. Revisión bibliográfica. A Comparative Analysis of Rainwater Harvesting System and Conventional Sources of Water - Abdul Salam Khan 2023

Título	A Comparative Analysis of Rainwater Harvesting System and Conventional Sources of Water	Marzo de 2023
autores	Abdul Salam Khan	
Año	Marzo de 2023	



Resumen	Caso de estudio Islamabad: Este estudio examinó los desafíos y la rentabilidad de las fuentes de agua existentes para uso potable y no potable en Islamabad. Se realizó una comparación entre las fuentes de agua existentes y la implementación del sistema de recolección de agua de lluvia (RWH, por sus siglas en inglés). Se propusieron cuatro modelos para evaluar la rentabilidad de diferentes fuentes de agua para diversas demandas.
metodología	<p>Recopilación de datos: Se obtuvieron datos sobre las fuentes de agua en Islamabad, incluyendo presas, suministro gubernamental, camiones cisterna y pozos.</p> <p>Modelado de escenarios: Se crearon cuatro modelos para evaluar la rentabilidad y eficacia de diferentes fuentes de agua, incluido el sistema de recolección de agua de lluvia (RWH), para satisfacer la demanda de agua potable y no potable.</p> <p>Análisis de datos de lluvia: Se utilizó un conjunto de datos de precipitación diaria de los últimos 30 años para evaluar la viabilidad del sistema de RWH en función de las condiciones climáticas locales y se compararon los resultados de los modelos en términos de costo y capacidad para satisfacer la demanda de agua.</p>
Resultado	Los hallazgos sugieren que algunas fuentes de suministro existentes son rentables pero insuficientes para satisfacer la demanda, mientras que otras fuentes pueden satisfacer la demanda; sin embargo, son mucho más caras. El sistema de RWH puede satisfacer de manera rentable la demanda potable; sin embargo, debe combinarse con la línea de suministro gubernamental para satisfacer la demanda no potable. El sistema de RWH es más económicamente viable para usos potables y no potables.
Cita	Khan. (2023). A Comparative Analysis of Rainwater Harvesting System and Conventional Sources of Water. Water Resources Management, 37(5), 2083–2106. A Comparative Analysis of Rainwater Harvesting System and Conventional Sources of Water SpringerLink (Khan, 2023)



Tabla 7. Revisión bibliográfica. Sustainability of rainwater catchment systems for small island communities - 2018

Título	Sustainability of rainwater catchment systems for small island communities	febrero de 2018
Resumen	<p>El estudio aborda la recolección de agua de lluvia, una práctica común en diversas partes del mundo para satisfacer las necesidades de agua doméstica, como consumo y cocina, riego, control de aguas pluviales, suministro de agua en áreas urbanas y gestión del agua en zonas rurales y urbanas. El rendimiento de estos sistemas se evalúa utilizando modelos de balance hídrico que estiman la entrada (volumen de lluvia) y la salida (demanda de agua) para determinar los cambios en el volumen almacenado de agua de lluvia a lo largo del tiempo. Esto permite analizar escenarios hipotéticos, evaluar el rendimiento de los sistemas existentes y cuantificar la influencia de diferentes características (área de captación en el techo, volumen del tanque de almacenamiento, fugas en los canalones, número de residentes, etc.) en la capacidad del sistema para almacenar suficiente agua de lluvia.</p>	
metodología	<ol style="list-style-type: none"> 1. Descripción de sistemas de RWCS y patrones de consumo en Ifalik mediante realización de encuestas en la localidad. 2. Construcción de balance hídrico diario para evaluar la sostenibilidad del sistema. 3. Construcción de curvas de diseño para evaluar y planificar sistemas de captación de aguas lluvias para Ifalik y comunidades con condiciones climatológicas similares. 	
Resultado	<ul style="list-style-type: none"> • El uso diario de agua per capita oscila entre 8 y 16 l/día, cercano de 20 l/día recomendado por la ONU. • Se utilizó un modelo de balance hídrico para evaluar los volúmenes de agua de lluvia almacenados al final del día para cada día durante el período de 1997 a 1999. Este período se eligió debido a una sequía de El Niño que ocurrió durante los primeros meses de 1998. • Encontró que la comunidad es resistente a la sequía, pero los sistemas individuales no lo son. Aumentar el área de techo con canalones mejora el rendimiento. 	



	<ul style="list-style-type: none"> Se presentan curvas de diseño para lograr niveles entre 80 y 99% de fiabilidad.
Cita	Bailey, Beikmann, A., Kottermair, M., Taboroši, D., & Jenson, J. W. (2018). Sustainability of rainwater catchment systems for small island communities. <i>Journal of Hydrology (Amsterdam)</i> , 557, 137–146. (Bailey, Kottermair, Taboroši, & Jenson, 2018)

Tabla 8. Revisión bibliográfica. *Pollutant Removal Efficiency in a Rainwater Treatment System in Roztocze National Park (Poland)*

Título	Pollutant Removal Efficiency in a Rainwater Treatment System in Roztocze National Park (Poland)
Autores	Anita Rainmondi Ruth Quinn Gopinathan Abhijith Gianfranco Becciu Avi Ostfeld Sustentability (MDPI)
año	2024
resumen	El artículo analiza la eficiencia de un sistema de tratamiento de agua de lluvia en el Parque Nacional de Roztocze (Polonia), diseñado para producir agua potable destinada al abrevadero de animales y otros usos. La investigación demuestra que un sistema bien planificado, con un tanque de volumen adecuado, puede reducir significativamente el consumo de agua potable. Si bien el agua de lluvia puede emplearse sin tratamiento para riego, su purificación amplía su utilidad para otros fines, como la hidratación de animales. Este enfoque es particularmente relevante frente al cambio climático, ya que contribuye a evitar el descenso del nivel freático.
Cita	Grabowski, T.; Bochniak, A.; Siwec, T.; Józwiakowski, K. Pollutant Removal Efficiency in a Rainwater Treatment System in Roztocze National Park (Poland). <i>Sustainability</i> 2024, 16, 4709. https://doi.org/10.3390/su16114709



3.3.2. Antecedentes: Experiencias mundiales

Canadá

En Canadá, la recolección de agua es una práctica que se viene dando hace muchas décadas, el hecho de capturar aguas de escorrentías en tejado para fines doméstico es una práctica que ha tenido mayor influencia en las áreas rurales de Canadá y en las últimas décadas se ha generado un interés particular en áreas urbanas, motivado principalmente por la sostenibilidad y el cambio climático, es decir la conciencia sobre el valor del agua y el medio ambiente. Aunque se entiende bien los beneficios de la recolección de agua, aún existe una serie de dificultades gubernamentales y de regulación del agua pluvial, contrastado con la incertidumbre en cuanto a costos y riesgos (Farahbakhsh, Despins, & Leidl, 2009). Frente a esto, Despins, Farahbakhsh y Leidl, realizaron un estudio sobre calidad de agua lluvia en sistemas de recolección en Ontario, Canadá en donde recolectaron una serie de muestras de diferentes sitios en un radio de 30 Km a la redonda entre el año 2006 y el año 2007 y descubrieron que la calidad del agua de lluvia recolectada podría gestionarse de manera satisfactoria mediante la selección de materiales apropiados y la implementación de tratamientos posteriores al tanque. (Despins, Farahbakhsh, & Leidl, 2009). Sin embargo, se ha identificado que a 2013 en Canadá, las cisternas se utilizan para el almacenamiento de agua a largo plazo (semanas a meses). Aunque varían en tamaño, un sistema promedio contiene alrededor de 15.000 litros de agua, lo que sustenta a un hogar por hasta tres meses, pero siguen existiendo riesgos asociados a la salud humana derivado de los tanques de almacenamiento, la recomendación del autor es mejorar las gestiones y las consideraciones gubernamentales para gestionar el riego a la salud humana. (Baird, Summers, & Plummer, 2013)

Australia

La experiencia de los ingenieros australianos con el objetivo específico de garantizar el suministro de agua adecuada (calidad y cantidad), demuestra que frente a los retos propuestos por el cambio climático y la variabilidad del clima los sistemas de agua reciclada desempeñaran un papel muy importante. La depuración de las aguas grises es de gran importancia ya que pueden ser regeneradas para reutilizarse como agua de riego de jardines o en la carga de cisternas de inodoros. Esta práctica tiene grandes ventajas desde un punto de vista medio ambiental, al mismo tiempo que supone un ahorro en el consumo. (Monitoring of household rainwater tank systems for rainwater usage, 2015)

Australia también tiene el caso particular que el agua dulce es un recurso muy valioso debido a su ambiente cálido y seco, a pesar que la recolección de aguas lluvias es una práctica milenaria desde la antigua Roma, aproximadamente el 19% de los hogares en Australia tienen tanques de tormentas, aunque en muchos de los casos no lo usan para consumo humano, el estado promueve el uso como una medida de conservación. (Guidance on use of rainwater tanks, 2011)



Cuba

Para el caso de la experiencia de Cuba se revisó un artículo en donde hizo una revisión bibliográfica sobre las tecnologías para el aprovechamiento de los sistemas de recolección de aguas lluvias haciendo una especie de cronología y la evolución de los sistemas en el tiempo. Se aprecia que el desarrollo tecnológico no solo se manifiesta en las técnicas disponibles, sino también en el uso que se le ha dado a este recurso. (Torres Hugues, 2019)

La recolección de agua de lluvia es una solución eficaz para la conservación del suelo y el suministro confiable de agua. Estudios han evaluado su efectividad en el cultivo doméstico en diferentes climas y encontraron que protege el suelo de la erosión y asegura la calidad del agua para uso doméstico. (Ricardo Calzadilla, Méndez Fernández, Bonet Pérez, Sierra Castellanos, & Cutié, 2015)

México

El caribe mexicano tiene una deficiencia en la prestación de servicios públicos, en consecuencia “la captación de agua de lluvia (CALL) podría representar una alternativa para satisfacer necesidades básicas” (Martinez, Narchi, Leal Bautista, Martinez, & Casas Beltrán, 2020). En esta investigación se abordó y se revisó el concepto del uso de agua proveniente de lluvias y entender los parámetros para tomar decisiones. El desarrollo de la investigación que tiene como objeto “Percepción y uso del agua de lluvia por usuarios en una comunidad del Caribe mexicano” se realizó teniendo en cuenta el resultado de unas encuestas realizadas a diferentes personas cabezas de hogar en una comunidad caribe mexicano denominada Puerto Morelos, Quintana, se evidencio que había sistemas muy rudimentarios (agua recolectada en embaces) y otro tanto la implementación de sistemas más complejos integrado a los sistemas de abastecimiento y sanitario del hogar. Sin embargo, en la mayoría de casos los sistemas de aguas lluvias tienen una percepción positiva, lo que en un futuro generaría una implementación integral de ese tipo de sistemas. (Percepción y uso del agua de lluvia por usuarios en una comunidad del Caribe mexicano, 2020)

Israel

Se analiza el caso de Israel, se realizó revisión bibliográfica de un estudio que examina la combinación de utilizar agua de lluvia para usos no potables y para la recarga de aguas subterráneas en un edificio en Tel Aviv, Israel, donde actualmente se recolecta agua de lluvia solo para la recarga de aguas subterráneas. En regiones con climas secos, la captación de agua de lluvia (RWH) se presenta como una fuente importante de agua no potable. Además, el agua de lluvia puede utilizarse para recargar acuíferos gestionados (MAR). Este estudio analiza el uso conjunto de RWH para el enjuague de aparatos sanitarios y recarga de acuíferos. (Nachson, y otros, 2022)





Francia

En Francia, la adopción de sistemas de recolección de aguas pluviales ha sido limitada, en parte debido a una ley francesa que restringe el uso doméstico del agua de lluvia para lavar la ropa, ducharse y beber. Esta ley limita el uso doméstico del agua de lluvia a aplicaciones externas, como el riego del jardín y la limpieza, debido a preocupaciones sobre la calidad del agua y posibles impactos en la salud pública, adicionalmente se calculó que el ahorro de agua con buenas condiciones de escorrentía puede representar un ahorro de 87% a recogida de agua de lluvia de los tejados, su almacenamiento y posterior uso para la descarga de inodoros puede ahorrar 42 m³ de agua potable al año para el sistema estudiado (Vialle, Sablayrolles, Lovera, & Christine Huau, 2011). Esto contrasta notablemente con una Directiva de la Unión Europea que prioriza el ahorro de agua en entornos urbanos, incluyendo la recolección y reutilización de aguas pluviales en edificios.

Suecia

Se han explorado las posibilidades de implementar un sistema de recolección de agua de lluvia en Ringdansen, una zona residencial en Norrköping, Suecia, analizando cuatro escenarios para el uso de agua de lluvia en un sistema dual de suministro de agua para complementar el agua potable. Se ha generado un modelo informático para cuantificar el potencial de ahorro de agua del sistema de recogida de agua de lluvia. El desempeño del sistema de agua de lluvia se describe por su eficiencia de ahorro de agua (WSE). En conclusión, es posible garantizar un ahorro de agua importantes con la implantación de estos sistemas de recolección de aguas lluvias, aunque promueven solo el uso en baños y letrinas. (Villarreal & Dixon, 2005)

Tabla 9. Contexto mundial de la utilización de tecnologías de aguas lluvias

País	Influencia de la recolección de aguas lluvias
Estados Unidos de América 	Aumento de popularidad en áreas con escasez de agua dulce y motivaciones ambientales. Encuesta revela uso para riego y ocasionalmente consumo humano. Aunado a eso se presentaron dificultades en monitoreo de calidad del agua recolectada lo que impide la gestión correcta de contaminantes.
Canadá 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Uso principalmente en comunidades rurales y renovado interés en áreas urbanas. ➤ Contribución a la conservación del agua y calidad de escorrentía. ➤ Obstáculos incluyen falta de política y costos. Importancia en comunidades rurales dependientes de agua local y



	necesidad de políticas para reducir impactos en la salud humana
<p>Brasil</p> 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Interés por crecimiento poblacional y demanda de agua potable. ➤ Análisis sugiere reducción significativa en demanda de agua potable de sistemas convencionales
<p>Reino Unido</p> 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Políticas gubernamentales para fomentar la recolección de agua de lluvia en viviendas. ➤ Enfoque en reducción de descargas pluviales y mitigación de inundaciones. (Sistema de drenaje urbano sostenible)
<p>Francia</p> 	Limitación legal del uso de agua de lluvia en interiores debido a preocupaciones de calidad y salud pública. Contrasta con directiva de la UE que prioriza ahorro de agua urbana y reutilización de agua de lluvia en edificios
<p>India</p> 	Adopción de recolección local de agua de lluvia como medida de adaptación a la variabilidad climática. Relación entre periodos de sequías y construcción de sistemas de recolección de agua de lluvia
<p>Suecia</p> 	La implementación de sistemas de aguas lluvias está impulsado por desarrollo sostenible, instalación en complejos de viviendas comunitarias rurales

3.4. Objetivo de Desarrollo Sostenible en Colombia

La Agenda 2030 de las Naciones Unidas, que es un plan de acción global adoptado por todos los países miembros de las Naciones Unidas en septiembre de 2015. La Agenda 2030 establece 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) que abordan una amplia gama de desafíos, como la pobreza, el hambre, la igualdad de género, el cambio climático y la paz y justicia.

Cada uno de estos Objetivos de Desarrollo Sostenible tiene metas específicas (un total de 169 metas) que sirven como puntos intermedios para medir el progreso hacia los objetivos más amplios. La Agenda 2030 busca un llamado mundial a la acción para equilibrar las dimensiones económica, social y ambiental del desarrollo sostenible.



Los avances serán monitoreados y revisados periódicamente, y se presentarán informes sobre la implementación de la Agenda 2030 en reuniones de alto nivel de la Asamblea General de las Naciones Unidas. El enfoque de la Agenda 2030 es inclusivo y pretende no dejar a nadie atrás, garantizando que el desarrollo sea sostenible, inclusivo y beneficie a todos, en todas partes.

En el contexto del abastecimiento de agua, la Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) abordan directa e indirectamente varios aspectos relacionados con la gestión del agua y el acceso sostenible a este recurso vital, sin embargo, el que nos ataña es el ODS 6. Agua Limpia y Saneamiento.

Por su parte Colombia en el Estudio Nacional del agua 2022 (ENA-2022) y El Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, presentan las metas asociadas a los ODS 6 como se puede evidencia en la Ilustración 6. Indicadores asociados a metas ODS con las cuales tiene compromisos el IDEAM a través de la subdirección de Hidrología.

Ilustración 6. Indicadores asociados a metas ODS con las cuales tiene compromisos el IDEAM a través de la subdirección de Hidrología. (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), 2023)



En el departamento del Chocó, especialmente en los municipios de Istmina, Quibdó y sus zonas rurales dispersas, los desafíos para cumplir con el ODS 6 son considerables. Estas comunidades enfrentan una limitada cobertura de servicios de acueducto y saneamiento, derivada de barreras de infraestructura y condiciones geográficas adversas. Sin embargo, el Chocó cuenta con un recurso invaluable: su alta pluviometría, que ofrece un potencial significativo para implementar sistemas de cosecha de aguas lluvias.



4. DEPARTAMENTO DE CHOCÓ – COLOMBIA

4.1. Descripción general del departamento del Chocó

El departamento del Chocó se encuentra en la región Pacífica de Colombia y es conocido por su gran riqueza natural y cultural. Geográficamente, está ubicado en el noroccidente de Colombia, limita al norte con el departamento de Antioquia, al sur con el departamento del Valle del Cauca, al oriente con los departamentos de Antioquia, Risaralda y Valle del Cauca, y al occidente con la República de Panamá. Esta localización le garantiza unas características climáticas y ambientales inigualables, siendo una de las regiones con mayor biodiversidad y pluviosidad del planeta

En términos de superficie, el Chocó ocupa aproximadamente 46.530 km², lo que corresponde al 4.07% del territorio nacional según la Federación Nacional de Departamentos de Colombia. Su relieve está compuesto principalmente por las llanuras costeras del Pacífico y la Serranía del Baudó, con una topografía caracterizada por zonas bajas y quebradas, y una densa red hidrográfica que incluye importantes ríos como el Atrato, San Juan y Baudó. (Gobernación del Chocó, 2024)

En la Ilustración 7. Mapa cartografía oficial del IGAC. (2017) Ilustración 7 se evidencia un mapa cartográfico desarrollado por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi, donde se muestra la localización geográfica del departamento.

El departamento del Chocó tiene cinco subregiones: Atrato, San Juan, Baudó, Pacífico y Darién (Rodríguez Díaz, 2017), cerca de 96% del territorio corresponde a tierras colectivas de comunidades negras, organizadas en 861 consejos comunitarios mayores y 2502 resguardos indígenas de las etnias Embera-Dóbrida, Embera-Katío, Embera-Chamí, Wounan y Tule, el 4% restante está habitado por población campesina (CORTE CONSTITUCIONAL, 2016).

Este departamento se destaca por ser la región más lluviosa del mundo, con una precipitación que oscilan entre 8.000 y 12.700 milímetros anuales (Murillo López, Córdoba Machado, & Palomino Lemus, 2008) ubicándola como una de las regiones más lluviosas del planeta, Como consecuencia de las altas precipitaciones, el departamento del Chocó presenta una gran cantidad de afluentes hídricos, donde sobresalen los ríos Atrato, San Juan, Baudó, Sipí, Tamaná, Bebarama, Salaqui, Munguido, Tanela, Etc.

El Chocó también forma parte de los departamentos priorizados dentro de los Programas de Desarrollo con Enfoque Territorial (PDET), una estrategia nacional para la transformación de territorios afectados por la violencia y la pobreza. De acuerdo con la Agencia de Renovación del Territorio, cuenta con 123 municipios incluidos en esta iniciativa. Esta priorización refleja la situación de vulnerabilidad que enfrenta la región, caracterizada por altos niveles de pobreza, especialmente pobreza extrema, y una significativa proporción de necesidades básicas insatisfechas. Además, el departamento ha sido afectado por la violencia, la debilidad institucional, la limitada capacidad de



gestión administrativa y la presencia de economías ilícitas, como los cultivos de uso ilícito. (Gobernación del Chocó, 2024)

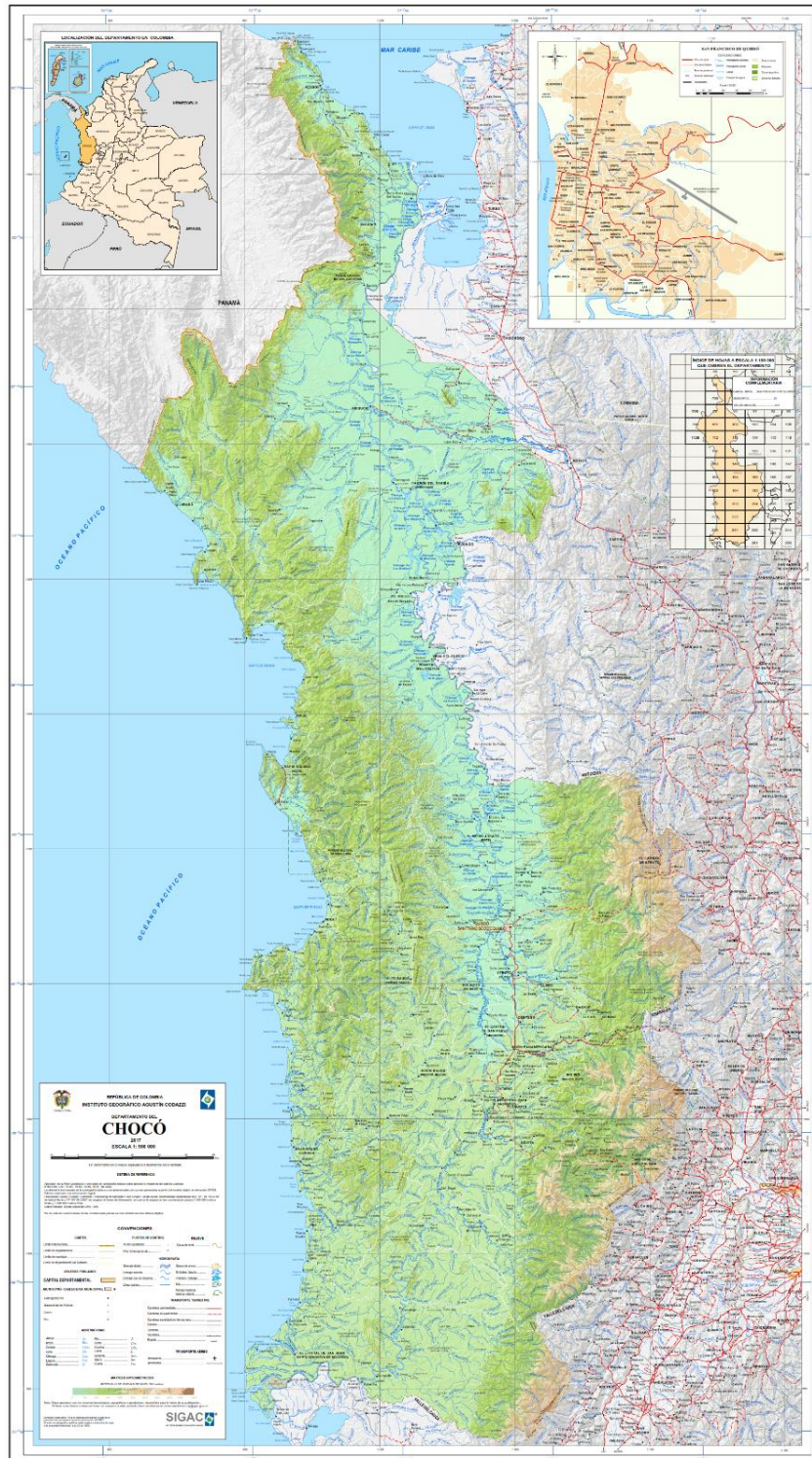


Ilustración 7. Mapa cartografía oficial del IGAC. (2017)



4.1.1. Demografía y población

Según datos reportados por la Gobernación del Chocó y con base en las proyecciones del Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE) derivadas del Censo Nacional de Población y Vivienda de 2018 (CNPV), se estima que para el año 2024 la población del departamento será de aproximadamente 605.478 habitantes. De este total, el 49,4% (298.866) corresponde a hombres y el 50,6% (306.612) a mujeres.

En cuanto a la distribución de la población por subregiones, la más poblada es la del Atrato, seguida por San Juan, Baudó, Darién y, por último, la subregión del Pacífico. Como se puede evidenciar en la Tabla 10.

Subregión	Total Población
Atrato	209.791
Baudó	116.651
Darién	115.956
Pacífico	37.241
San Juan	125.839
Total	605.478

Tabla 10. población departamento del Chocó por subregión 2024. (Plan de desarrollo departamento de Chocó 2024 - 2027)

A diferencia de la tendencia observada a nivel nacional, la población rural en el Departamento del Chocó ha experimentado un aumento considerable, representando aproximadamente el 57,1% del total de habitantes, una proporción significativamente superior a la media nacional. Esta característica refleja las particularidades culturales, económicas y sociales de la región.

Es importante señalar, que, aunque algunas áreas urbanas del Chocó están clasificadas como tal según los conceptos del Departamento de Planeación y otras entidades gubernamentales, su estructura y uso del espacio se asemejan más a los patrones rurales. Esto se refleja en la forma en que se desarrollan las principales actividades económicas, como la agricultura, la pesca, la minería artesanal y la recolección de recursos naturales. Además, las dinámicas sociales están marcadas por fuertes lazos comunitarios y familiares, donde las relaciones de fraternidad y colaboración entre los habitantes siguen siendo una prioridad.

El Chocó, es un departamento muy rico en materia cultural, es una región habitada en su mayoría por personas afrodescendientes e indígenas. Estas comunidades mantienen sus tradiciones culturales, lenguas, dichos y costumbres que enriquecen la diversidad demográfica del este territorio. Sin embargo, también enfrentan altos índices de pobreza y necesidades básicas insatisfechas, siendo el acceso al agua potable uno de los problemas más críticos en las zonas rurales dispersas. La región presenta una de las coberturas más bajas en servicios públicos esenciales del país, lo cual limita su desarrollo (DNP, 2023).



4.2. Importancia del Chocó como área de estudio

El departamento del Chocó está ubicado en la región Pacífica de Colombia y cuenta con una posición geográfica estratégica, Es el único departamento de Colombia con costas en los océanos Pacífico y Atlántico. Es igualmente el único departamento limítrofe con Panamá. En ella se encuentra la ecorregión que probablemente tenga la mayor pluviosidad del planeta, lo que representa una ventaja en términos comerciales y ambientales. Pese a esto el departamento del Chocó encabeza la lista de las regiones con mayor rezago en materia de educación, abastecimiento básico, infraestructura, salud y desarrollo económico (Universidad Nacional de Colombia, 2022). Según el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE), para el año 2023, los departamentos que experimentan mayor pobreza monetaria fueron el departamento del Chocó con 67.7%, seguido del departamento de La Guajira con 65.3%.

En materia de cobertura de agua potable el departamento del Chocó, el Super Intendente de servicios públicos manifestó “La situación de los servicios públicos en Chocó es un ejemplo claro de las debilidades del modelo actual, pues debido a sus características geográficas y la vulnerabilidad económica de una parte importante de sus habitantes, la provisión de los servicios de energía, agua y aseo no son rentables para el sector privado.” (Superintendencia de servicios públicos domiciliarios, 2023) y también menciona que el departamento del Chocó es el departamento con menor índice de calidad, cobertura y continuidad del servicio de abastecimiento de agua. Según los datos del departamento Nacional de Planeación (DNP), el índice de cobertura en el departamento asciendo a tan solo 57.66%, cerca de 17 puntos porcentuales por debajo de la media del país, en Ilustración 8 se muestra la cobertura de acueducto en todo el país, elaborada con información de la superintendencia de servicios públicos.

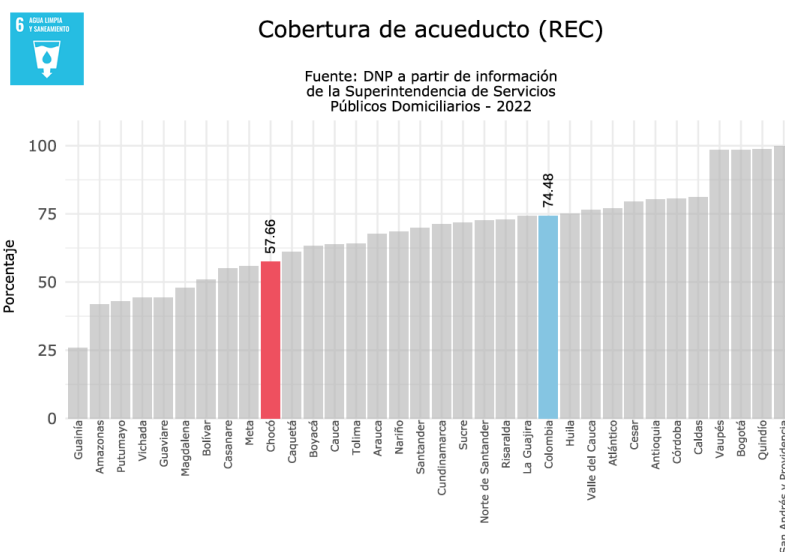


Ilustración 8. Cobertura de acueducto (REC). DNP.



Paradójicamente, a pesar de ser el departamento con mayor potencial hídrico de Colombia, gracias a su abundante red de afluentes y su elevado volumen de precipitación, el Chocó presenta algunos de los peores indicadores en acceso a agua potable y saneamiento básico. Esta situación contradice su riqueza natural y representa un obstáculo significativo para el cumplimiento del Objetivo de Desarrollo Sostenible (ODS) 6, que busca garantizar la disponibilidad y la gestión sostenible del agua y el saneamiento para todos.

En este contexto, los municipios de Quibdó e Istmina específicamente en la zona rural dispersa de acuerdo a definiciones y caracterizaciones anteriormente expuestas, seleccionados como caso de estudio, son ejemplos representativos de las condiciones que enfrentan las poblaciones ribereñas rurales del departamento. Ambos municipios se caracterizan por contar con alta densidad de poblaciones dispersas, acceso limitado a infraestructura básica, una marcada dependencia de los cuerpos de agua cercanos para sus actividades diarias y lluvias anuales que oscilan entre 6000mm y 12000mm.

Su ubicación en una de las regiones más lluviosas y húmedas del planeta genera una oportunidad para implementar soluciones alternativas de abastecimiento, como la cosecha de aguas lluvias, que pueden garantizar un suministro continuo y seguro de agua potable, contribuyendo de manera importante a la mejora de la calidad de vida de las comunidades rurales. Además, contribuye a la competitividad de la región y a la satisfacción de necesidades básicas actualmente insatisfechas. La adopción de este tipo de soluciones no solo beneficiaría a la población local, sino que también contribuiría al cumplimiento de los compromisos nacionales con el Objetivo de Desarrollo Sostenible (ODS) 6, que busca garantizar el acceso universal al agua potable y al saneamiento adecuado.

4.3. Condiciones climáticas del departamento del Chocó

4.3.1. Clima general

El Chocó presenta un clima, cálido y húmedo, con temperaturas medias anuales que oscilan entre 24°C y 28°C. La región no presenta grandes variaciones estacionales debido a su proximidad con la línea ecuatorial, lo que resulta en un clima estable a lo largo del año. (Instituto de Investigaciones Ambientales del Pacífico - IIAP, 2017)

Según la clasificación de Köppen, el clima del Chocó es super húmedo de selva, con lluvias durante todo el año. Las condiciones son húmedas al norte del departamento municipios como Acandí, Unguía y la zona del Urabá Chocoano y se incrementan gradualmente hacia el centro, formando un óvalo que limita al norte con Quibdó, con Lloró al este y con Istmina al sur¹, siendo esta una de las pocas regiones del mundo que alcanza, en oportunidades, volúmenes de lluvia superiores a los 10.000 mm al año, las

¹ Área que incluye los casos de estudio de la presente investigación.



condiciones húmedas disminuyen hacia la parte costera y al este, en la cordillera Occidental, siendo el clima de tipo súper húmedo.

En el departamento del Chocó se encuentran cuatro pisos térmicos: cálido, medio, frío y muy frío. El piso térmico cálido representa un poco más del 90% del departamento, los pisos medio, frío y muy frío, se encuentran ubicados al Este en la cordillera Occidental, en los municipios de San José de Tadó (límite con el Dto de Risaralda), Carmen de Atrato (límite con el Dto de Antioquia), San José del Palmar (límite con el departamento del Valle del Cauca).

4.3.2. Características de la pluviosidad

Gracias a la ubicación geográfica, la diversidad de relieve y la gran variedad de climas que posee, Colombia es uno de los países que cuenta con mayor riqueza hídrica en el mundo. La disponibilidad de agua en el país se ve reflejada en el sinnúmero de recursos hídricos con los que cuenta, los cuales se distribuyen por toda su superficie terrestre. Colombia se encuentra privilegiada al estar limitada por dos océanos, el Pacífico y el Atlántico. (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), 2023).

Como se evidencia en Ilustración 9 hay registros de datos promedios que demuestran que hay zonas en el pacífico colombiano que están por encima de los 10000 mm al año y valores promedio de más de 4000 mm en el año lo que es una cifra bastante representativa ya que el promedio anual 1168mm al año según The Global Economy.

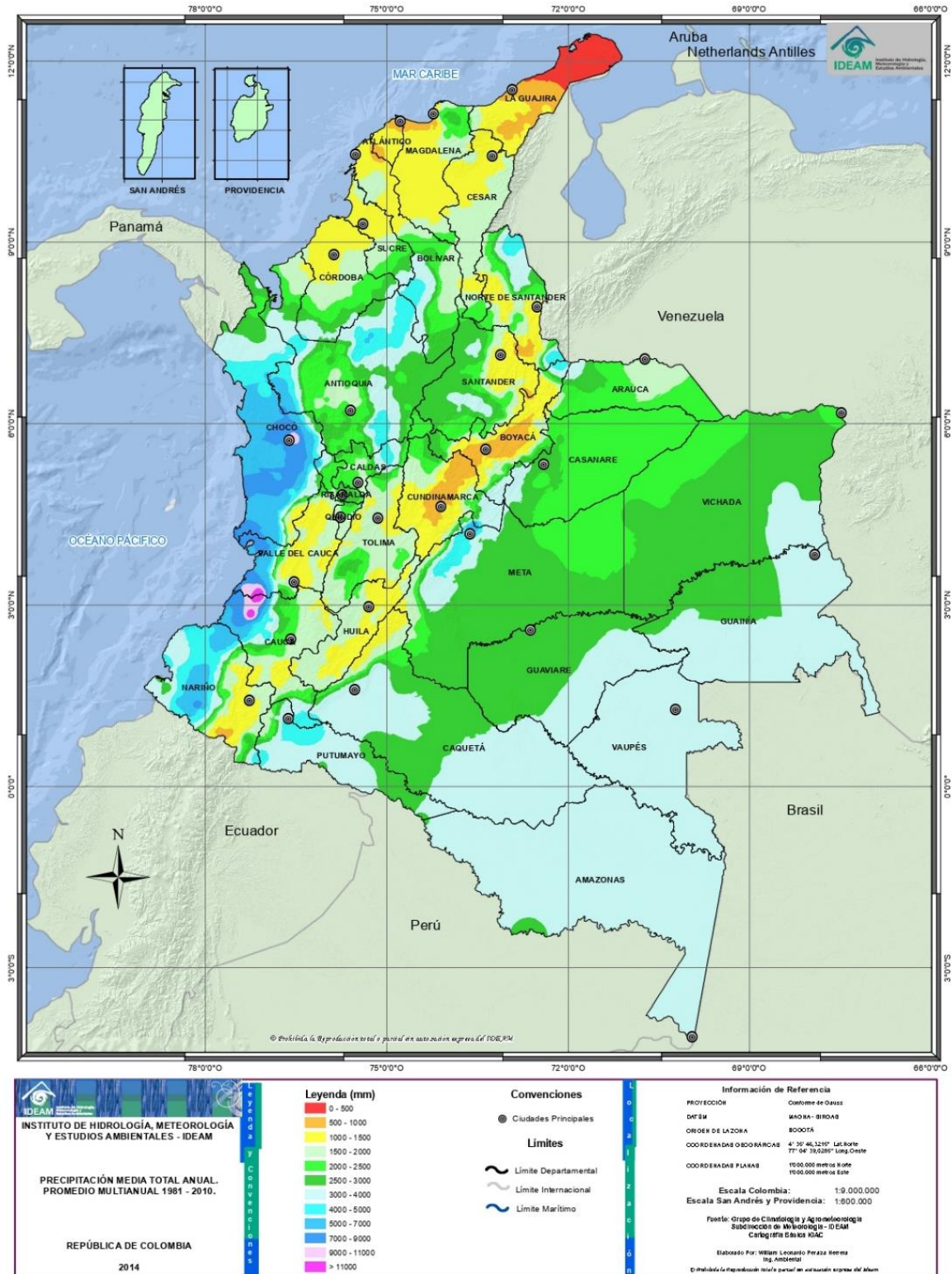


Ilustración 9. Precipitación Media Total Anual Promedio Multianual 1981 - 2010 - IDEAM 2014



El departamento del Chocó es considerado como el departamento más lluvioso de todo Colombia y compite junto con Cherrapunji, en la india y el monte Waialeale, en Hawaii por el primer puesto a nivel mundial. Factores fisiográficos como la Serranía del Baudó y la Cordillera Occidental, su orientación, forma, altitud, vegetación exuberante y distancia al litoral, entre otros, son responsables de la convección forzada y profunda de grandes cantidades de vapor de agua y núcleos de condensación, transportadas por los vientos alisios al recurrirse y enfrentarse con este sistema orográfico. (Instituto de Investigaciones Ambientales del Pacífico - IIAP, 2017)

El Departamento del Chocó se destaca por ser la región con el mayor volumen de lluvias en Colombia. En gran parte de su zona central y sur, las precipitaciones superan los 7.000 mm anuales. Los niveles más altos de lluvia se registran en la región centro-oriental, especialmente entre los municipios de Lloró y Quibdó, donde las precipitaciones anuales superan los 10.000 mm. Por otro lado, la región con menores lluvias se encuentra en el extremo norte, particularmente en la zona de Urabá, donde los registros descienden hasta los 2.500 mm al año. En la Ilustración 10 se puede evidenciar un Mapa de Precipitación anual del Departamento del Chocó, en donde se puede ver que es un departamento muy lluvioso en su mayoría.

El desarrollo de la investigación se realizó con datos de las estaciones meteorológicas del IDEAM en Istmina y Quibdó, las cuales evidencian la intensidad y persistencia de las lluvias, con registros históricos que destacan su alto potencial hídrico y su impacto en las dinámicas sociales y ambientales de la región.

En la estación de Istmina, el año más lluvioso fue 2015, con un total de 16,400 mm de precipitación. Para el año 2024, hasta el 11 de noviembre, ya se han acumulado 13,607 mm, lo que refleja la magnitud de las lluvias aún sin concluir el periodo anual. El mes con mayor promedio histórico de precipitaciones es agosto, con 879.95 mm, mientras que febrero presenta el promedio más bajo, con 575.38 mm. Además, el año 2005 se destacó por registrar la mayor cantidad de días lluviosos, con 294 días, frente a 2020, que tuvo el menor número con 227 días. El 21 de diciembre de 2018 se registró el día con la mayor precipitación, alcanzando 422 mm. Los meses de agosto, septiembre y octubre concentran las lluvias más intensas, mientras que enero, febrero y diciembre presentan menores volúmenes, aunque aún significativos en comparación con otras regiones del país.

Por su parte, en la estación de Quibdó, el año con mayor precipitación acumulada fue 2006, con un registro de 9,628 mm, mientras que, en 2024, hasta el 11 de noviembre, ya se han acumulado 7,491 mm. Al igual que en Istmina, agosto es el mes más lluvioso, con un promedio de 612.09 mm, y febrero es el de menor precipitación promedio, con 383.36 mm. El año 2008 tuvo el mayor número de días lluviosos, alcanzando 336 días, mientras que 2023 registró el menor número, con 299 días. El 25 de diciembre de 2008 marcó el día con mayor precipitación, registrando 216.1 mm. Aunque Quibdó presenta una



pluviosidad ligeramente menor que Istmina, sigue siendo una de las zonas más lluviosas del mundo, con una distribución similar de picos y bajos en los meses mencionados.

Estos datos confirman la excepcional pluviosidad de la región, caracterizada por lluvias intensas y persistentes a lo largo del año, con pocas temporadas secas. Este patrón climático no solo define las condiciones de vida de las comunidades locales, sino que también refuerza la viabilidad de sistemas de cosecha de aguas lluvias como alternativa sostenible para garantizar el acceso al agua potable en zonas rurales dispersas.

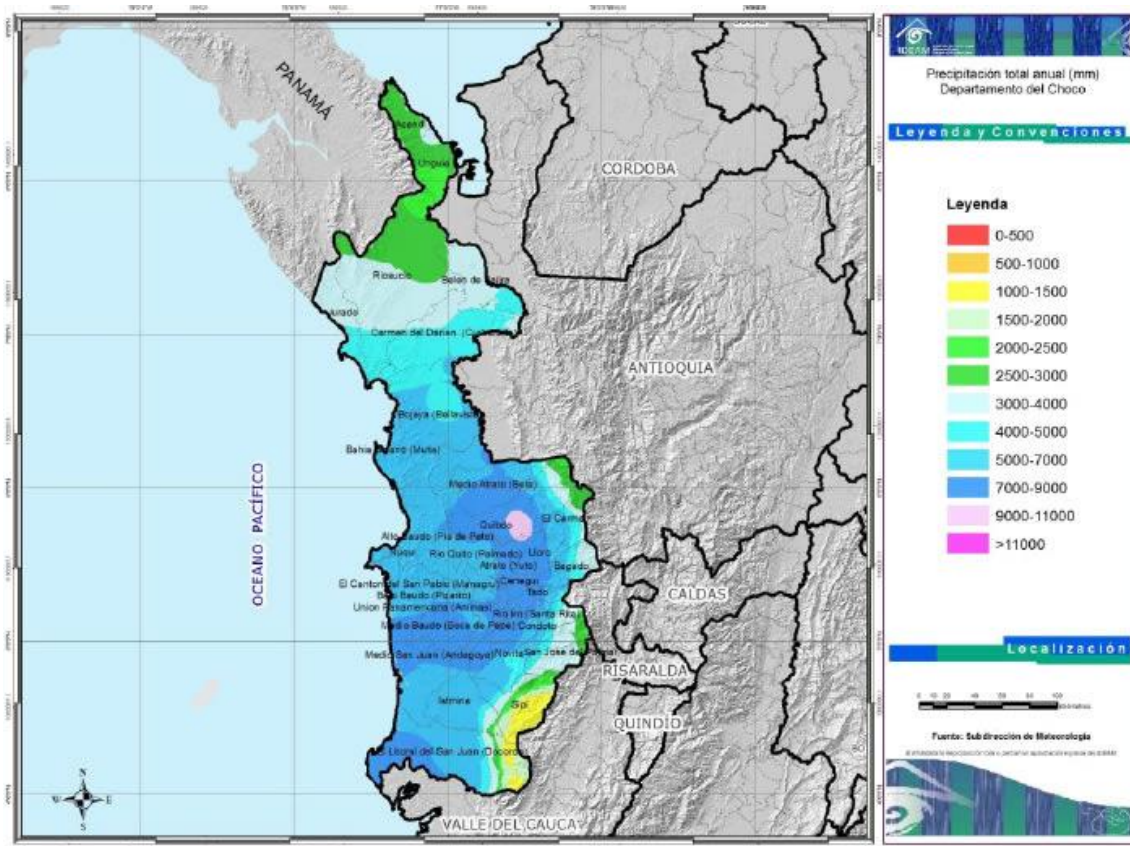


Ilustración 10. Mapa Precipitación anual del Departamento del Chocó - IDEAM

El departamento del Chocó, dadas sus características geográficas y climáticas, se presenta como el escenario óptimo para la implementación de tecnologías alternativas de abastecimiento de agua potable, especialmente en las zonas rurales dispersas donde las necesidades son más apremiantes.



5. DEMANDA DE AGUA

5.1. Demanda de agua según Organización Mundial de la Salud

Según la Organización Mundial de la Salud (OMS), el suministro mínimo de agua para cubrir las necesidades básicas de una persona debe ser de al menos 50 a 100 litros por persona al día (lpd). Este rango asegura el acceso suficiente para beber, cocinar, y mantener una higiene básica.

La OMS desglosa la demanda de agua de la siguiente forma:

- Consumo de agua potable: aproximadamente 5 litros por persona al día.
- Preparación de alimentos: unos 10 a 20 litros por persona al día.
- Higiene personal: alrededor de 15 a 30 litros por persona al día.
- Limpieza del hogar e higiene adicional: 10 a 20 litros por persona al día.

Este rango de 50 a 100 lpd está diseñado para garantizar una buena calidad de vida, pero en situaciones de emergencia o en contextos con escasez extrema, la OMS establece un mínimo de 20 lpd como cantidad suficiente para cubrir las necesidades esenciales (mínimo vital), aunque esta cantidad limita las actividades de higiene y confort.

5.2. Demanda de agua Para Colombia

En Colombia se establecen diferentes parámetros para tener en cuenta en el cálculo de la demanda teniendo en cuenta diferentes parámetros como uso, temperatura, altura sobre el nivel del mar, entre otros.

5.2.1. Resolución 0330 de 2017

La Resolución 0330 de 2017 es la norma por la cual se adopta el Reglamento Técnico para el Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS), en su artículo 43 establece las dotaciones deben determinarse haciendo uso de datos históricos de los consumos de agua potable de los suscriptores, disponible por parte de la persona prestadora del servicio de acueducto o, en su defecto, recopilada en el Sistema Único de Información (SUI) de la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios (SSPD), siempre y cuando los datos sean consistentes. En todos los casos, se deberá utilizar un valor de dotación que no supere los máximos establecidos en la siguiente tabla.

Tabla 11. Dotación neta máxima por habitante (Res 0330 de 2017 - Art 43)

ALTURA PROMEDIO SOBRE EL NIVEL DEL MAR DE LA ZONA ATENDIDA	DOTACIÓN NETA MÁXIMA (L/HAB*DÍA)
> 2000 m s. n. m.	120
1000 – 2000 m s. n. m.	130
< 1000 m s. n. m.	140



5.2.2. Resolución 844 de 2018

La Resolución 844 de 2018 es la normal que parametriza los requisitos técnicos para los proyectos de agua y saneamiento básico de zonas rurales que se adelanten bajo los esquemas diferenciales. En el artículo 32 numeral 1. Establece que Los valores de dotación neta deberán encontrarse entre 20 L/hab*día y 200 L/hab*día, diferenciando el volumen para atender las necesidades de consumo humano, las domésticas y las de subsistencia de la familia rural.

5.2.3. Reglamento Técnico Del Sector Agua Potable Y Saneamiento Básico - RAS, Título J

El RAS en el título J define “Alternativas tecnológicas en agua y saneamiento para el sector rural”, para efectos de demanda de agua establece tres niveles de servicios que varían en función del uso del agua, siendo el nivel 1 el más limitado y el nivel 3 el que ofrece mayor cobertura en termino de actividades, a continuación, se relacionan cada uno de ellos:

Tabla 12. Demandas de agua de acuerdo con lo estipulado en el RAS- Rural (Avellaneda Franco, 2020)

Nivel	Demanda	Características
Nivel de servicio 1 – bajo	Menor o igual a 20 lppd	Este es un nivel de servicio bastante precario para la provisión en el periodo de tiempo más crítico al final de una escasez prolongada de oferta de agua, en donde los sistemas centralizados pueden ser sometidos a racionamientos rigurosos o cuando las fuentes de agua disponibles en el predio reducen su caudal drásticamente En estas condiciones el agua para consumo humano debe limitarse al agua de bebida, la necesaria para preparar los alimentos de la familia, y el lavado de manos y utensilios de cocina. Estas dos últimas pueden ser almacenadas para reusarlas en la descarga del inodoro.
Nivel de servicio 2 – medio	Entre 20 y 40 lppd	Este es un nivel de servicio que obliga también al uso eficiente y ahorro del agua en el hogar y es el que se da generalmente cuando la provisión se hace acarreado el agua desde pilas públicas o desde aljibes o cuando el sistema centralizado de agua está sometido a un régimen de racionamiento de medio tiempo. En estas condiciones el agua debe usarse primordialmente para bebida, la necesaria para preparar los alimentos de la familia, aseo corporal limitado, lavado de manos, y utensilios de cocina, y descarga del inodoro con agua reciclada. El lavado de ropa deberá ser programado con los ahorros que se puedan almacenar
Nivel de servicio 3 – alto	Entre 40 y 100 lppd	Este también es un nivel de servicio que obliga al uso eficiente del agua en el hogar pero que permite, además de los usos anteriores, cubrir el lavado de ropa y la limpieza del hogar



6. TRATAMIENTO Y DESINFECCIÓN DE AGUA PARA CONSUMO HUMANO

En el año 2001, las Naciones Unidas declararon el acceso al agua limpia como un "derecho humano básico", destacando su relevancia para la salud, el desarrollo sostenible y la dignidad humana. Como parte de este compromiso global, se fijó el objetivo de reducir a la mitad el número de personas sin acceso a agua potable y saneamiento para el año 2015. A pesar de los avances logrados, el acceso al agua segura sigue siendo un desafío crucial, especialmente en comunidades rurales dispersas y con limitaciones económicas. (McAllister, 2005)

En este capítulo, se analizan diferentes tecnologías de tratamiento y desinfección de agua, con un enfoque particular en soluciones sostenibles y de uso individual, diseñadas para satisfacer las necesidades de hogares en contextos de alta vulnerabilidad y aplicables para aguas lluvias. Estas tecnologías no solo deben garantizar la calidad del agua para consumo humano, sino también ser prácticas, accesibles y adaptables a las condiciones específicas de las comunidades rurales dispersas de Colombia.

Es necesario que el agua retirada y destinada al consumo directo de las personas sea tratada antes de su ingesta. El tratamiento debe estar dirigido a la remoción de las partículas sólidas suspendidas que no fueron retiradas en el proceso de tratamiento primario que es netamente mecánico y sedimentológico y en segundo lugar al acondicionamiento bacteriológico.

El proceso de desinfección tiene el objetivo principal de garantizar la eliminación de patógenos que causan impactos negativos en la salud que se encuentran en el agua. Los microorganismos entre virus, bacterias, entre otros más comunes encontrados en el agua el amilobácter, coliformes y salmonela, dentro de los virus es posible encontrar hepatitis A, adenovirus, entre otras enfermedades.

Existen diversos tipos de métodos de desinfección que se implementan de acuerdo a las condiciones, ventajas y desventajas de cada método, dentro de los cuales esta

- Cloración: es efectiva para neutralizar virus y bacterias, protección residual contra contaminación en almacenamiento, además automatizar el proceso de cloración y desinfección es relativamente sencillo y económico; sin embargo, tiene algunas desventajas como que en altas dosis es extremadamente tóxico, el sabor y el olor pueden ser molestos, entre otros.
- Cloraminación: Protección residual contra la recontaminación, es eficaz contra la formación de biopelículas en la distribución sistema con las desventajas que las partículas de cloraminas pueden ser perjudiciales para personas dializadas.



- **Ozonización:** este método tiene la ventaja de no depender de un suministro continuo de químicos y resulta ser eficaz contra bacterias, virus y protozoos (Giardia y Cryptosporidium), pero la lámpara de ozonización debe ser reemplazada cada 6 o 12 meses y tienen mercurio el cual puede ser tóxico en caso de un accidente o mala manipulación. La eficiencia de este sistema se ve comprometida en la medida que existan contaminantes químicos, la inadecuada manipulación del agua y la formación de biopelículas.
- **Filtración:** este proceso consiste en la retención de elementos de 0.01 a 10 mm mediante la utilización de membranas y materiales filtrantes. Esta técnica es recomendada para anteceder los procesos de desinfección química, es decir, la técnica podría aplicarse con éxito para la clarificación, pretratamiento y eliminación de partículas gruesas.
- **Luz Ultravioleta:** La fuerte luz solar desinfecta el agua al desactivar permanentemente bacterias, esporas, mohos y virus. Las investigaciones identificaron la parte del espectro electromagnético responsable de este conocido efecto; longitudes de onda entre 200 nm y 300 nm, a menudo llamadas UV-C. (Avellaneda Franco, 2020).
- **Desinfección solar:** La desinfección solar es un método simple y de bajo costo que utiliza la radiación solar para mejorar la calidad del agua destinada al consumo humano. Este proceso consiste en exponer botellas transparentes llenas de agua a la radiación UV y al calor generado por el sol, logrando la eliminación de microorganismos patógenos. En sistemas de captación de aguas lluvias, las botellas pueden colocarse en la cubierta de las viviendas, maximizando la exposición al sol. Según un estudio publicado en *Water Science & Technology: Water Supply* (Meera & Ahammed, 2008) la desinfección solar es eficaz en climas soleados, logrando la inactivación completa de coliformes totales en agua recolectada de techos tras 6 horas de exposición con una intensidad solar superior a 500 W/m², sin evidencia de reactivación de microorganismos tras 24 horas de almacenamiento.

Si bien este método es una solución accesible en países en desarrollo, depende completamente de las condiciones climáticas. En días nublados o temporadas de baja radiación solar, su efectividad disminuye, por lo que es necesario complementarlo con otros métodos para garantizar la calidad del agua de manera constante.

6.1. Sistemas de Tratamiento de Agua para Uso Individual en Comunidades Rurales

- **Filtro cerámico impregnado con Plata coloidal:** El filtro cerámico utiliza plata coloidal, carbón activado y cerámica porosa para eliminar bacterias, olores y partículas de 0.5 a 1 micrometro. Un estudio en Camboya



mostró que estos filtros reducen E. coli en un 99% y bacteriófagos en un 90-99%. (Brown & Sobsey, 2010) Con un costo producción de menos de 12 USD por unidad si se hace de manera artesanal, los filtros cerámicos ofrecen una solución económica y efectiva para el tratamiento de agua potable, filtrando hasta 20 litros al día (Lerma Arias, 2012). El elemento filtrante puede tener una vida de aproximadamente 2 años, y el recipiente más de 5 años. Están disponibles de manera comercial en un rango de precios de \$160.000 a \$420.000 pesos colombianos.

Ilustración 11. Filtro cerámico purificador de agua (fuente: alfa)



- **Filtro de Arena:** La filtración lenta en arena es un método eficaz y rentable para purificar agua, especialmente en países en desarrollo. Este proceso, usado desde hace más de 150 años, elimina sedimentos y patógenos mediante un tratamiento biológico al pasar agua contaminada por una capa de arena. Aunque en países industrializados su uso ha disminuido por altos costos de terreno y mano de obra, sigue siendo una solución prometedora para sistemas de agua sostenibles. A diferencia de la filtración rápida, la filtración lenta en arena se basa en procesos biológicos más que físicos, garantizando una purificación eficiente del agua. (Bruni & Spuhler, 2018)

Estos filtros pueden ser operados y monitoreados por las comunidades si los cuidadores reciben una capacitación adecuada. El mantenimiento diario requiere menos de una hora para ajustar tasas de flujo y verificar su correcto funcionamiento. La limpieza, que puede realizarse en un solo día con varias personas, exige medidas higiénicas estrictas. Un filtro bien diseñado requiere pocas reparaciones, limitándose generalmente a las válvulas y tubos metálicos, mientras que los tanques y el sistema de drenaje presentan alta durabilidad. (CENTRO DE AGUAS Y SANEAMIENTO AMBIENTAL, 2008)

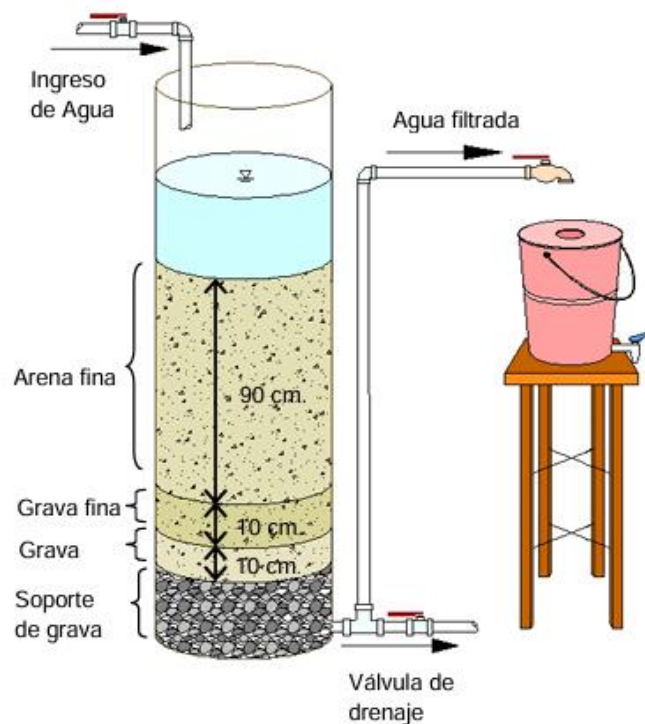


Ilustración 12. Unidad de Filtración de Agua a nivel domiciliario - Universidad Mayor de San Simón Bolivia

- **Desinfección Solar:** La desinfección solar utiliza la radiación UV de la luz solar como principal agente para inactivar microorganismos en el agua, siendo favorecida por el calor que aumenta la temperatura del agua. Si esta supera los 50 °C, el tiempo de tratamiento disminuye significativamente. Este método ha demostrado remover hasta 3 órdenes logarítmicos de coliformes termotolerantes y microorganismos como *Vibrio cholerae* y *Salmonella*. (CENTRO DE AGUAS Y SANEAMIENTO AMBIENTAL, 2008)

Un estudio sobre el tratamiento de agua de lluvia recolectada en techos mostró que la desinfección solar puede ser una solución económica para países con climas soleados. Con una exposición de 6 horas a intensidades solares superiores a 500 W/m², se logró la inactivación total de coliformes totales sin evidencia de reactivación tras 24 horas de almacenamiento. Aunque es una solución económica y efectiva en climas soleados, su dependencia total de las condiciones climáticas la hace poco resiliente para situaciones donde la disponibilidad de sol es limitada o impredecible. (Meera & Ahammed, 2008)

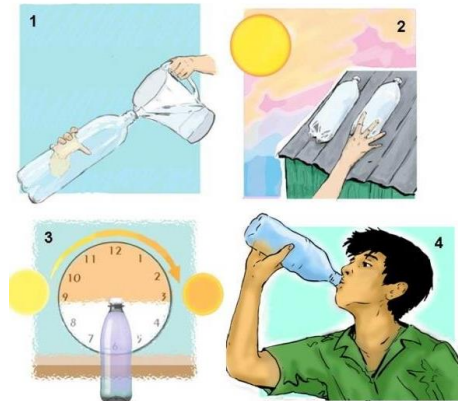


Ilustración 13. agua potable mediante el proceso SODIS - Meera & at 2008

- **Desinfección por cloración:** La cloración, introducida masivamente a principios del siglo XX, es un método eficiente, rápido y económico para desinfectar agua, complementando la filtración. Además de eliminar microorganismos dañinos, también reduce niveles de hierro, manganeso y sulfuro de hidrógeno. Su ventaja principal radica en la capacidad del cloro residual de prevenir la recontaminación del agua. (Shrestha, Dangol, & Spuhler, 2018)

El hipoclorito de calcio y el hipoclorito de sodio son los compuestos más utilizados. El hipoclorito de calcio está disponible en polvo o pastillas con concentraciones de 35-70% de cloro activo, mientras que el hipoclorito de sodio, comúnmente conocido como lavandina, tiene una concentración líquida promedio de 6-10%. Es esencial evitar productos con sustancias tóxicas no aptas para consumo humano. Ambos compuestos inactivan microorganismos a través de ácido hipocloroso (HOCl) o ion hipoclorito (OCl⁻). (CENTRO DE AGUAS Y SANEAMIENTO AMBIENTAL , 2008)

- **Filtro de carbón activado:** filtro de carbón activado impregnado con plata coloidal que inhibe la reproducción de microorganismos presentes en el agua, además de eliminar hasta en un 98% olor, color, sabor, cloro residual y compuestos químicos de tipo orgánico. El producto tiene un valor comercial de entre \$210.000 (USD\$50) y \$320.000 (USD\$80) y se le debe cambiar el cartucho de carbón activado cada 6 meses y tiene un costo aproximado de \$39.000 (USD\$10), la capacidad de este sistema es de 45l/hora.



Ilustración 14. Filtro de carbón activado



- **Filtro multicapas:** es un filtro lento compuesto de cinco elementos: Carbón Activado: remueve el cloro y productos químicos. WSM-300: poderoso material esterilizante, elimina cualquier bacteria y mantiene el pH del agua. Arena de Sílice: remueve los componentes ácidos del agua para mantener su balance de pH. Zeolita: remueve los metales pesados tales como plomo y aluminio. Arena Mineral: compuesta de elementos favorables para la salud como el potasio, el sodio, el calcio y el magnesio. El costo del componente es de \$100.000 (USD\$5) a \$195.000 (USD\$49) y requiere cambiar el filtro cada 6 meses y tiene un valor de \$25.000 (USD\$6) , la capacidad de este sistema es de 1.25 litros por hora.

Ilustración 15. filtro multicapa



- **Filtro de osmosis inversas y luz ultra violeta:** consiste en un sistema de purificación que tiene una capacidad de 3.8 LPS, el cual tiene 5 etapas con diferentes sistemas de filtrados que tiene carbón activado en bloque y granular, lámpara de luz ultra violeta, abrillantados y polipropileno, el cual garantiza potabilizar el agua. El sistema tiene un costo de \$480.000



(USD\$120) y un costo de mantenimiento cada 6 meses que fluctúa entre los \$60.000 (USD\$15) y \$70.000 (USD\$17.5).

Ilustración 16. filtro de osmosis inversa y luz ultravioleta (fuente: evans)



6.2. Tratamiento de agua para zonas rurales dispersas

Este apartado presenta una evaluación detallada de diversas tecnologías de potabilización de aguas lluvias, enfocada en identificar la opción más adecuada para su implementación en áreas rurales dispersas del departamento del Chocó, con énfasis en los municipios de Quibdó e Istmina que son el caso de estudio de esta investigación. En las comunidades rurales dispersas se requiere una solución efectiva que garantice calidad y sostenibilidad en el suministro de agua. Para este análisis, se diseñó una matriz multicriterio que pondera factores clave como los costos de implementación y mantenimiento, la eficiencia en la remoción de contaminantes, la durabilidad de los sistemas, la facilidad de instalación y uso, y la resiliencia ante condiciones ambientales y logísticas complejas.

Cada tecnología fue evaluada en una escala de 1 a 10, donde una puntuación más alta representa un mejor desempeño en el contexto local, tomando en cuenta criterios establecidos por la normativa colombiana. Este análisis se fundamenta en el Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS 2000, Título J), y en las Resoluciones 0330 de 2017, 844 de 2018 y 799 de 2021, que estipulan los parámetros y estándares de calidad del agua y las características técnicas mínimas para los sistemas de potabilización en zonas rurales dispersas. Estas normativas guiaron la estructuración de los criterios en la matriz y aseguraron que cada opción evaluada cumpla con los requisitos técnicos y legales para su implementación en el contexto del Chocó. De esta manera, el análisis no solo facilita la selección de la tecnología más adecuada para el caso de estudio, sino que también contribuye a establecer lineamientos replicables en otras regiones rurales dispersas del país con necesidades similares.



La valoración de cada tecnología en la matriz multicriterio se realizó utilizando una escala de 1 a 10 como se evidencia en la Ilustración 17, donde los puntajes más altos indican un mejor desempeño en relación con cada criterio. Para asegurar una evaluación objetiva y ajustada a las condiciones específicas de las zonas rurales dispersas de Quibdó e Istmina en el Chocó, se consideraron tanto aspectos técnicos como económicos, guiados por las normativas colombianas en abastecimiento de agua potable y saneamiento básico.

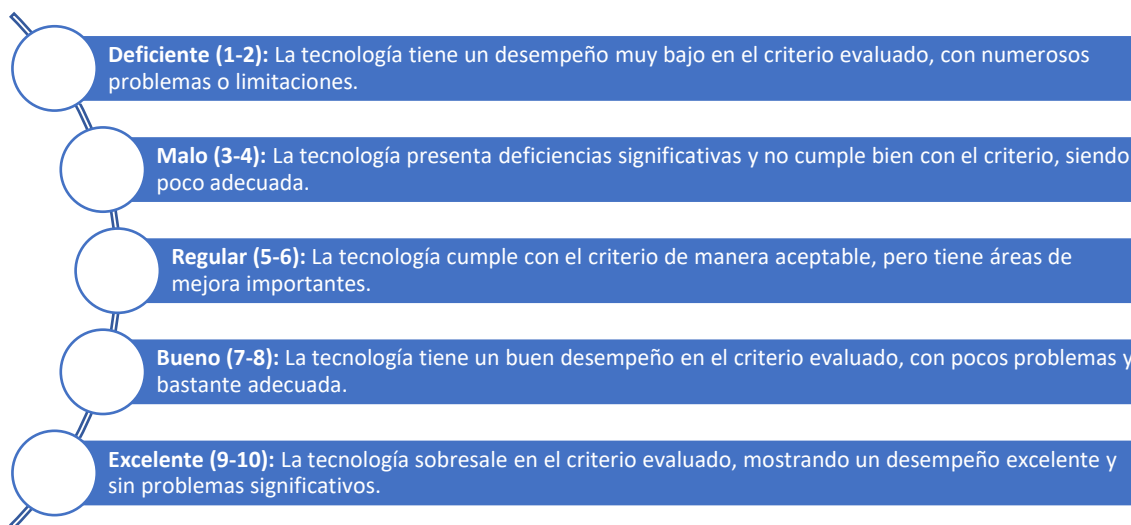


Ilustración 17. Criterios de ponderación selección de alternativa zona de estudio.

Cada criterio fue ponderado y valorado según su relevancia en el contexto rural, evaluando:

- ✓ **Costo de Implementación:** Se evaluó el costo inicial de cada tecnología, asignando puntuaciones más altas a aquellas con menor inversión, favoreciendo opciones más asequibles para comunidades rurales con recursos limitados.
- ✓ **Costo de Mantenimiento:** Este criterio consideró tanto la frecuencia como el costo de mantenimiento requerido. Las tecnologías que necesitan menos intervenciones y menores costos de mantenimiento recibieron puntuaciones más altas, buscando opciones sostenibles en el tiempo.
- ✓ **Eficiencia de Remoción de Contaminantes:** Se calificó la capacidad de cada tecnología para eliminar contaminantes, otorgando una mayor puntuación a aquellas que presentan una alta eficiencia en la remoción, lo cual es crucial para la calidad del agua en áreas con acceso limitado a sistemas centralizados de potabilización.
- ✓ **Durabilidad:** Se valoró la vida útil de cada tecnología, dando preferencia a las soluciones con mayor durabilidad y resistencia a las condiciones ambientales del Chocó, para asegurar una inversión a largo plazo en las zonas rurales.
- ✓ **Facilidad de Instalación:** Este criterio se enfocó en la simplicidad del proceso de instalación, valorando aquellas tecnologías que no requieren herramientas



especializadas ni habilidades técnicas avanzadas, facilitando su implementación en áreas de difícil acceso.

- ✓ **Resiliencia:** Este criterio valoró la capacidad de cada tecnología para adaptarse a variaciones en la calidad del agua y en las condiciones ambientales, asignando mayores puntuaciones a las tecnologías más flexibles y adaptables, fundamentales en contextos con alta variabilidad climática y de calidad del agua en zonas rurales dispersas.
- ✓ **Facilidad de Uso:** Se evaluó la sencillez en la operación diaria de cada tecnología, con una puntuación más alta para aquellas que pueden ser utilizadas sin requerir capacitación técnica constante, garantizando que las comunidades puedan operar los sistemas de manera autónoma.

La valoración resultante en cada criterio refleja una evaluación integral de las capacidades de cada tecnología para cumplir con los requerimientos establecidos por el RAS 2000 y las Resoluciones 0330 de 2017, 844 de 2018 y 799 de 2021, además se hizo un análisis exhaustivo de literatura relacionada con cada una de las tecnologías, analizando casos de éxito e investigaciones realizadas a nivel mundial logrando una aproximación balanceada entre la viabilidad técnica, económica y normativa para su aplicación en el caso de estudio.

Tecnología	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	Puntuación total
Ósmosis Inversa Descentralizada	4	3	10	7	4	3	8	39
Desinfección Ultra violeta (UV)	6	4	9	5	7	5	7	43
filtro de arena Lento	8	7	7	8	5	7	7	49
Filtro de vidrio triturado	8	6	7	8	4	7	7	47
Filtro de arcilla impregnado con plata coloidal	9	10	7	8	9	8	9	60
Filtro de carbon activado	8	6	5	8	5	7	6	45
desinfección solar	10	9	3	9	9	0	5	45
Microfiltrado	7	6	6	7	7	5	7	45
Desinfección con Cloro en el Tanque de almacenamiento	6	3	6	5	5	6	8	39

Ilustración 18. Matriz multicriterio selección sistema de tratamiento zona rural dispersa

A continuación, se presentan los resultados de la matriz multicriterio, que sintetizan la evaluación de diversas tecnologías para la potabilización de aguas lluvias en zonas rurales dispersas. Esta tabla resume las puntuaciones obtenidas por cada tecnología en función de criterios clave como costos de implementación y mantenimiento, eficiencia de remoción de contaminantes, durabilidad, facilidad de instalación y uso, y resiliencia. Los resultados reflejan la capacidad de cada opción para satisfacer las necesidades de agua potable en el contexto local (caso de estudio), proporcionando una base sólida para la



toma de decisiones informadas. A continuación, se invita a revisar la Tabla 13. Análisis de resultado evaluación multicriterio que concluye sobre cada tecnología evaluada.

Tecnología	Conclusión
Ósmosis Inversa Descentralizada	Es muy eficiente para eliminar contaminantes, pero presenta desafíos en costos y mantenimiento. Aunque su instalación es algo compleja, es fácil de usar. En general, es una tecnología efectiva pero costosa, de alto mantenimiento y con grandes limitaciones por la presión necesaria para funcionar.
Desinfección Ultra violeta (UV)	Muy eficaz en eliminar microorganismos, pero con costos y mantenimiento relativamente altos. La instalación es fácil, pero su rendimiento depende de la calidad del agua.
filtro de arena Lento	Ofrece una buena combinación de costos moderados, durabilidad y eficiencia, con mantenimiento y facilidad de instalación aceptables. Ideal para zonas rurales con presupuestos limitados.
Filtro de vidrio triturado	Ofrece buena eficiencia y durabilidad con un impacto ambiental positivo. Los costos y mantenimiento son moderados, y la instalación es relativamente sencilla. Ideal para comunidades que valoran la sostenibilidad.
Filtro de arcilla impregnado con plata coloidal	Excelente en eficiencia, durabilidad, y facilidad de uso, con bajo costo de mantenimiento. Es una opción robusta y sostenible para entornos rurales.
Filtro de carbón activado	Equilibra bien costos, eficiencia, y durabilidad, con mantenimiento y facilidad de instalación favorables. Aunque por sus propiedades se puede considerar como una opción complementaria a otra tecnología, como el filtro de arena o filtro de vidrio triturado.



desinfección solar	Bajo costo operativo y bajo mantenimiento, utilizando la energía solar para eliminar microorganismos. Eficaz y sostenible, aunque la velocidad de desinfección puede depender de la intensidad solar y el tiempo de exposición lo que lo hace poco resiliente. Ideal para áreas con buen acceso a luz solar.
Micro filtrado	Ofrece una buena eficiencia y durabilidad con costos y mantenimiento moderados. La instalación es relativamente sencilla, y la resiliencia es regular porque requiere una presión mínima de servicio. Es una opción equilibrada para la filtración de partículas grandes, sin embargo, no es tan eficiente contaminantes de menor tamaño
Desinfección con Cloro en el Tanque de almacenamiento	Los costos de implementación son moderados, pero el mantenimiento es alto debido al suministro constante de insumos. La durabilidad y la facilidad de uso son buenas, con una instalación sencilla. La resiliencia es regular, ya que el ajuste del químico depende de los parámetros del agua. Es adecuada para una calidad agua aceptable en almacenamiento.

Tabla 13. Análisis de resultado evaluación multicriterio

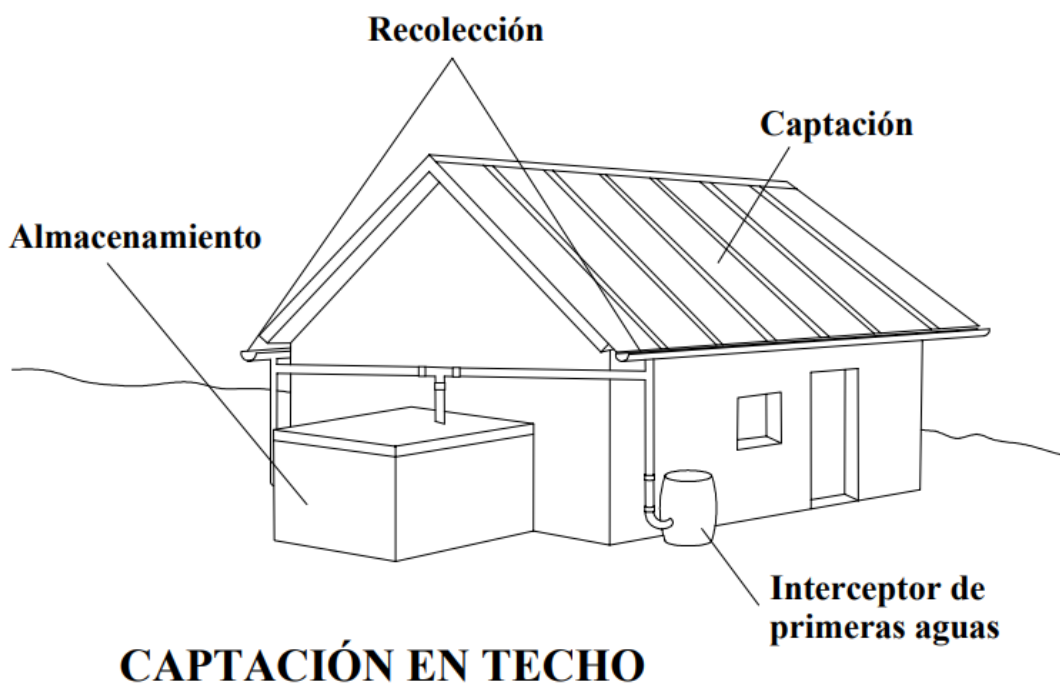
El filtro de arena impregnado con plata coloidal obtuvo una calificación total de 60 puntos, destacándose como una de las tecnologías más adecuadas para la potabilización de aguas lluvias en zonas rurales dispersas de Quibdó e Istmina. Esta tecnología se distingue por su bajo costo de implementación y mantenimiento, así como por su alta eficiencia en la remoción de contaminantes, lo que asegura la calidad del agua. Además, su durabilidad y facilidad de instalación permiten una rápida adopción en comunidades con recursos limitados. La capacidad de este sistema para ser operado con un mantenimiento relativamente simple y su resiliencia ante variaciones en la calidad del agua son aspectos que lo convierten en una opción confiable y sostenible para satisfacer las necesidades de agua potable en el contexto rural del Chocó. Así las cosas, y después de aplicar la metodología planteada a partir de una matriz multicriterio, el filtro de arena impregnado con plata coloidal representa una solución eficaz y accesible que cumple con los estándares requeridos, alineándose con las normativas colombianas y favoreciendo la salud pública en estas comunidades.



7. SISTEMA DE RECOLECCIÓN DE AGUAS LLUVIAS

Desde el principio, las primeras civilizaciones han aprovechado el agua superficial, construyendo las primeras poblaciones a orillas de diferentes cuerpos de agua y aprendiendo a utilizarla para temas agrícolas y producción de cultivos, además como vía de transporte. De la misma forma empezaron su aprendizaje en la aplicación del agua lluvia, aunque en ese momento no dependían de ésta para sobrevivir. (GUZMÁN CONDIA & BARROS CERVANTES, 2018).

Ilustración 19. Sistema de captación de agua lluvia (Organización Panamericana de la Salud, 2004)



La recolección de agua de lluvia se presenta como una alternativa accesible para satisfacer las necesidades de consumo humano y agrícolas en diversas regiones del mundo, caracterizadas por altos o moderados niveles de precipitación, donde la oferta de agua en cantidad y calidad adecuadas para el consumo es limitada, la captación de agua de lluvia puede considerarse como una fuente vital de abastecimiento. Este proceso implica la captación, conducción, tratamiento y almacenamiento del agua de lluvia en depósitos destinados a su uso futuro. En el ámbito doméstico, es común utilizar la superficie del tejado como área de captación para maximizar la recolección de agua de lluvia. Este enfoque sencillo y eficaz contribuye significativamente a la autosuficiencia hídrica, especialmente en áreas con condiciones climáticas propicias para este método de obtención de agua, como en zonas rurales dispersas de alta precipitación. (Organización Panamericana de la Salud, 2004)



La captación de las aguas lluvias presenta múltiples ventajas, tales como:

- En lugares alejados de chimeneas industriales y alta contaminación atmosférica la calidad físico química del agua es aceptable.
- Tiene la capacidad de ser implementado de manera individual por lo que es adecuado para comunidades alejadas y/o dispersas.
- La implementación del sistema no requiere demasiados costos adicionales ya que el sistema de cosecha de agua en su mayoría está conformado por materiales inherentes a cualquier edificación.
- En la mayoría de casos no se requiere de energía para la operación.
- Es un sistema relativamente fácil y económico de mantener
- El sistema de recolección de aguas lluvias tiene un costo de operación nulo.

Sin embargo, a pesar que es un sistema con muchas bondades también presentan algunas desventajas como:

- La cantidad de agua captada es variable en función de la precipitación del lugar de implementación, del área y material de la cubierta.
- Para la implementación de sistemas de aguas lluvias es necesaria la utilización de almacenamiento lo que se traduce en espacio para su colocación.

A continuación, se hará una descripción de cada componente para un sistema de captación de uso doméstico, pues el propósito del proyecto es desarrollar la metodología de diseño para su uso en zonas rurales.

7.1. Componentes

El sistema de captación de aguas lluvias para uso doméstico está conformado por distintos elementos, con la clara finalidad de captar y aprovechar las aguas de lluvia para su utilización en comunidades rurales dispersas. Este conjunto de componentes se coloca, asegurando un suministro sostenible y eficiente mediante la recolección de las precipitaciones de la zona de donde se implemente el mencionado sistema.

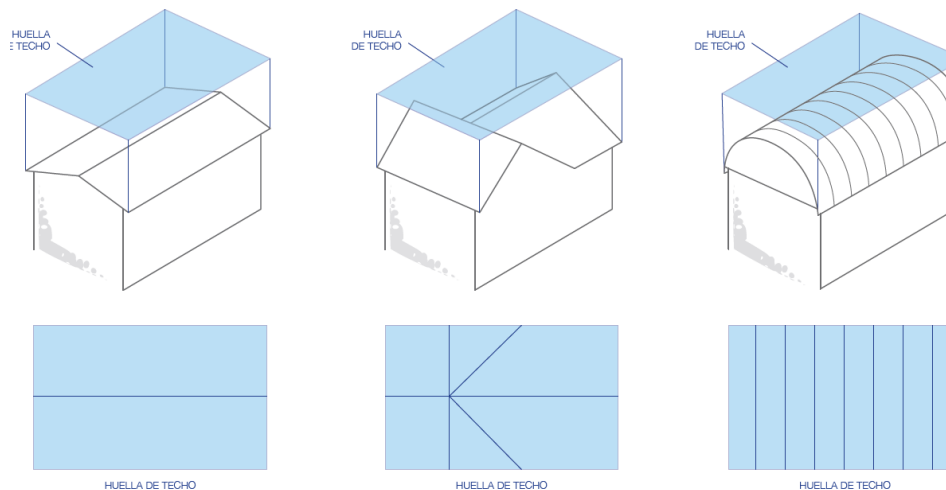
7.1.1. Captación

La captación de agua lluvias se fundamenta en la utilización del techo de la edificación, considerando aspectos como la pendiente y la superficie para facilitar el escurrimiento eficiente de las aguas de lluvia hacia el sistema de recolección. Es esencial calcular la proyección horizontal, huella o área efectiva del techo para garantizar una captación efectiva como se muestra en la Ilustración 20 (Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México (Sedema), 2020)



Ilustración 20. Área efectiva de techo (Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México (Sedema), 2020).

Huella de techo



En este contexto, la superficie captadora principal es el techo, cuya pendiente adecuada es esencial para cumplir su función. Se debe calcular el área en planta del techo, no la inclinada, para determinar la cantidad de agua recolectada. Además, cabe destacar que la captación también puede llevarse a cabo mediante techos o cubiertas verdes, que no solo contribuyen al cuidado ambiental, capturando CO₂, sino que también tienen un impacto estético en la arquitectura. La evolución en los materiales de construcción ha propiciado mejoras en los techos. Los materiales comunes incluyen plástico, acero, polimglass, aluminio y cerámica. (Moreno Lozano, 2020)

Se recomienda evitar la presencia de ramas sobre el techo para prevenir la contaminación del agua por excrementos de aves u otros desechos animales. Asimismo, es crucial evitar el acceso de roedores, ya que podrían introducir agentes patógenos y bacterias al agua recolectada. Se sugiere realizar la limpieza del techo al menos una vez al mes, contribuyendo así a mejorar la calidad del agua almacenada. Este enfoque integral en el diseño y mantenimiento del sistema de captación garantiza la eficiencia y la potabilidad del agua pluvial recolectada.

En cuanto a la pendiente de la cubierta, debe tener una pendiente tal que el agua corra o escurra por gravedad (no inferior al 3%) hacia los sistemas de recolección, la pendiente del techo debe estar dada para minimizar en la medida de lo posible la cantidad de longitud de conducción y evitar irregularidades en la cubierta que permitan estancamientos.

Sobre el mantenimiento, se recomienda evitar la presencia de ramas sobre el techo para prevenir la contaminación del agua por excrementos de aves u otros desechos animales. Asimismo, es crucial evitar el acceso de roedores, ya que podrían introducir agentes



patógenos y bacterias al agua recolectada. Se sugiere realizar la limpieza del techo al menos una vez al mes, contribuyendo así a mejorar la calidad del agua almacenada (Moreno Lozano, 2020).

7.1.2. Conducción y recolección

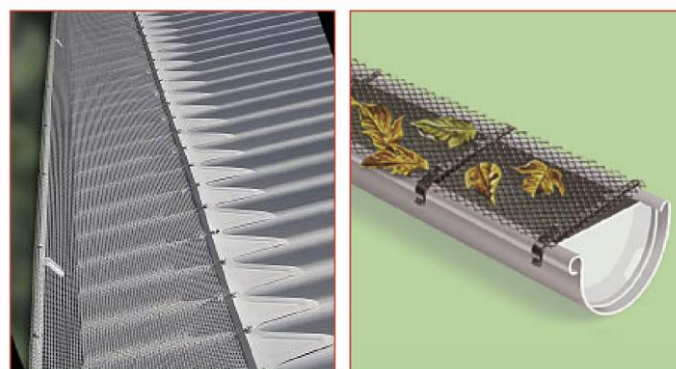
El sistema de conducción se refiere de manera genérica al conjunto de tuberías o conductos de diferentes composiciones o materiales que transportan el agua al sistema de almacenamiento a través de las bajantes, en la mayoría de casos, estos conductos son de PVC o acero galvanizado.

Ilustración 21. Tipos de canaletas (imagen de referencia) fuente: Rain Gutters solution



Estos elementos se ubican en la zona más baja de la cubierta, hacia donde las aguas lluvias escurran por efectos de la gravedad antes de caer al suelo. El material de las canaletas debe ser liviano, pero a su vez resistente, debe ser modular, es decir que se puedan empalmar tramos continuos, debe ser un material con baja capacidad de erosión y que no contamine al agua que quede en contacto con el material. Se recomienda que las canaletas tengan mallas en la parte superior para evitar que al sistema de almacenamiento y posterior filtrado se conduzcan basuras, hojas, ramas, y en general cualquier elemento que pueda obstruir la bajante o contaminar el agua, esto a su vez genera la necesidad de estar limpiando con recurrencia estas mallas para evitar obstrucciones.

Ilustración 22. Canaletas con malla para evitar la contaminación por hojas (Hernandez Martínez, 2019).

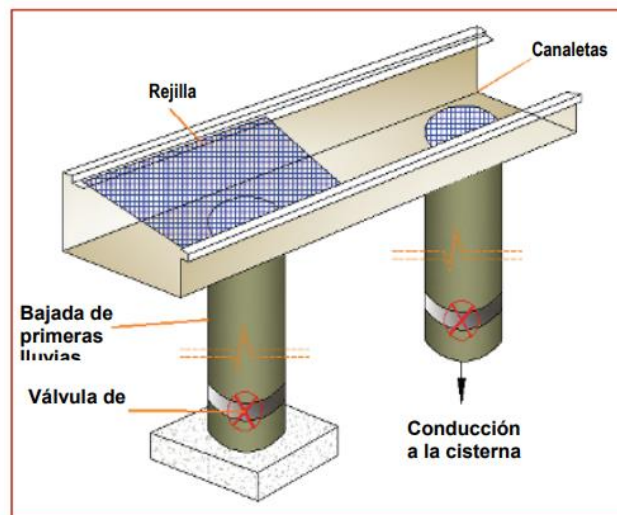




“Los materiales utilizados son: aluminio, lámina galvanizada, PVC y recursos maderables de cada región. Actualmente se ha visto que los arquitectos, ingenieros y dueños de casas consideran estructuras diversas para la colección del agua de lluvia.” (Hernandez Martínez, 2019)

Para el caso del primer lavado es necesario contar con un sistema (ver Ilustración 23) para lograr separarlas, toda vez que se pueden constituir una posible fuente de contaminación teniendo en cuenta las características atmosféricas del lugar de implementación del sistema.

Ilustración 23. Canaleta con rejilla y válvula para el lavado para las primeras lluvias (Hernandez Martínez, 2019).



7.1.3. Interceptor de primeras lavado

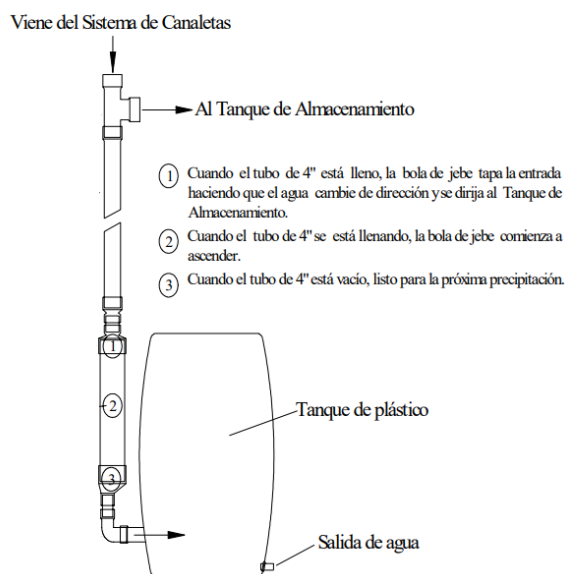
En el caso de la captación de agua de lluvia desde los techos, se recomienda utilizar un tanque para almacenar temporalmente las primeras lluvias, que pueden estar contaminadas con basura, hojas y polvo que no quedo retenida en las rejillas de las canaletas. Esta agua se puede destinar a usos como el riego de plantas u otras aplicaciones que no requieran una alta calidad del agua.

La manera más sencilla de implementar este componente es un sistema en el cual el agua ingresa a un tanque pequeño a través de un bajante conectado a las canaletas. Además, se incorporará una válvula de flotador que permitirá el llenado del tanque. Una vez alcanzado el nivel deseado, la válvula bloqueará el paso del agua al interceptor y la dirigirá hacia el tanque de almacenamiento. Para facilitar el mantenimiento después de cada lluvia, se instalará una válvula de purga en la parte inferior del tanque.



Ilustración 24. Interceptor de Primeras Aguas (Organización Panamericana de la Salud, 2004).

**INTERCEPTOR DE LAS
PRIMERAS AGUAS**



La cantidad de agua que debe ser separada puede variar teniendo en cuenta muchos parámetros como la duración de periodo sin lluvias, y contaminación atmosférica, material de la cubierta entre otras; sin embargo, se presenta la siguiente tabla se presenta una relación de diferentes criterios presentados por diferentes autores. (Moreno Lozano, 2020)

Tabla 14. Volumen de separación óptimo (Moreno Lozano, 2020)

Referencia	Especificaciones	Separación recomendada
(Yaziz, et al. 1989)	Seguridad contra contaminación microbiana	0,33 mm
(Ntale, et al. 2003)	Valor empírico *Se debe disminuir en temporada de lluvia	0,83 mm o primeros 10 minutos de lluvia
(Martinson y Thomas, 2005)	Basado en medidas de muestra	Por cada mm lavado, la carga contaminante será reducida a la mitad
(Cunliffe, 1998)	Para un techo promedio	20 a 25 litros
(Rain Harvesting)	Contaminación mínima, Contaminación media, Contaminación alta	0.2 mm - 0.5 mm - 2 mm respectivamente



(Pacey and Cullis, 1986)		Primeros 10 minutos del evento de lluvia
(Texas Water Development Board, 2005)	Dependiendo de días secos, escombros, árboles y la estación del año	0.41mm a 0.82 mm
(Michaelides, 1987)	Basado en trabajo experimental en Tailandia	0.28 mm

7.1.4. Almacenamiento

El componente de almacenamiento, ya sea en forma de tanque o cisterna, desempeña un papel crucial al acumular, conservar, regular y suministrar el agua recolectada por la lluvia. Este sistema asegura la disponibilidad del recurso para diversos usos, incluyendo consumo humano, actividades domésticas o agrícolas, con el objetivo de garantizar su eficiencia y durabilidad. La Organización Panamericana de la Salud, en la "Guía de Diseño para Captación del Agua de Lluvia", establece criterios esenciales para el almacenamiento, destacando las siguientes características:

- El material del tanque debe ser impermeable para evitar la pérdida de agua por goteo o transpiración
- La altura máxima del tanque no debe ser mayor a dos metros para evitar sobre presiones.
- El reservorio debe tener tapa para impedir el ingreso de elementos antrópicos que puedan afectar el agua
- Se debe disponer de una entrada lo suficientemente grande para permitir el ingreso para limpieza o eventuales reparaciones.
- La entrada y el rebose deben contar con mallas para evitar el ingreso de insectos y animales.
- Dotado de dispositivos para el retiro de agua y el drenaje.

Los materiales más utilizados para la construcción o implementación de tanques de almacenamiento de aguas lluvias en el medio rural pueden ser los siguientes:

- Madera: Madera silvestres, a pesar de que en la ruralidad se siguen utilizando este tipo de materiales no es común verlos, toda vez que resulta costoso y poca eficiente su construcción, porque se hace necesario hacerle un tratamiento especial a la madera para que sea impermeable.
- Concreto: son tanques que por lo general son muy costos y difíciles de construir, en caso se optar por esta alternativa es para tanques subterráneos, ya que para hacerlos elevados requieren una estructura demasiado robusta y antieconómica.



Ilustración 25. tanque construido en concreto



- Plásticos: son elementos prefabricados, livianos y resistente que por lo general son de fibra de vidrio, polietileno y PVC, se encuentra disponible en el mercado gran cantidad de tamaños desde los 200 litros hasta los 5000 litros, lo que lo convierte en la alternativa más eficiente.

Ilustración 26. tanque de almacenamiento plástico de prefabricado tipo botella (Pavco Wavin)



El adecuado dimensionamiento del tanque de almacenamiento en un sistema de recolección de agua de lluvia es esencial para lograr un equilibrio entre la oferta y la demanda. Si el tanque se dimensiona en exceso, se incurre en costos innecesarios, mientras que un tanque demasiado pequeño no satisfará la demanda.

En cuanto a la ubicación, en sistemas simples de recolección, se recomienda colocar el tanque en un lugar bajo y de fácil acceso, típicamente cerca de la canaleta bajante y a una altura conveniente para facilitar la utilización del agua de manera sencilla. En sistemas



más complejos, los tanques se instalan bajo el suelo, requiriendo el uso de bombas manuales o eléctricas para facilitar la distribución eficiente del agua.

7.1.5. Tratamiento

El agua de lluvia ofrece diversas aplicaciones domésticas, se debe limitar su consumo directo o restringirlo en casos particulares. Esto se debe a la posible presencia de elementos nocivos para la salud. Por lo tanto, se recomienda evitar el consumo directo y su utilización en la preparación de alimentos para garantizar la seguridad y bienestar de las personas. Es fundamental tomar precauciones adicionales y, cuando sea necesario, recurrir a tratamientos específicos para garantizar la calidad del agua destinada al consumo humano.

“Es necesaria que el agua retirada y destinada al consumo directo de las personas sea tratada antes de su ingesta. El tratamiento debe estar dirigido a la remoción de las partículas que no fueron retenidas por el dispositivo de intercepción de las primeras aguas, y en segundo lugar al acondicionamiento bacteriológico.” (Organización Panamericana de la Salud, 2004), así las cosas, es importante para la utilización de implementos de desinfección en lugares donde se pretenda usar el agua para el consumo humano, por lo que se recomienda a implementación de alguno de los dispositivos especificados en el título 4.1.4 TRATAMIENTO Y DESINFECCIÓN.

7.2. Parámetros de diseño

En el diseño de un sistema de captación de agua de lluvia es necesario considerar los factores técnicos, económicos y sociales;

7.2.1. Factor técnico

Los factores a tener en cuenta para diseño de un sistema de recolección de agua deben fundamentarse en la cantidad de agua que se requiere en la vivienda y la cantidad de agua que se puede captar en el área de la edificación, así:

- La oferta de agua se refiere a la producción vinculada a la precipitación pluvial a lo largo del año, así como a las variaciones estacionales de esta precipitación. En consecuencia, resulta crucial disponer de datos proporcionados por la autoridad competente del país o región donde se planea hacer la implementación del sistema. Estos datos son esenciales para comprender la disponibilidad y variabilidad del recurso hídrico, factores fundamentales en la planificación y ejecución exitosa de proyectos relacionados con el agua.
- La demanda de agua se refiere a la cantidad de agua necesaria para satisfacer las necesidades de los usuarios.

7.2.2. Factor económico

La inversión necesaria para implementar el sistema guarda una relación directa con el área de captación y el volumen de almacenamiento, lo que a menudo se convierte en una



restricción para la mayoría de los usuarios. En el análisis económico, es fundamental considerar que la dotación de agua por familia no debe ser inferior a 20 litros diarios, cantidad esencial para satisfacer sus necesidades básicas. No obstante, aspectos como la higiene personal y el lavado de ropa deben atenderse con otras fuentes de agua de ser posible.

En la evaluación económica, se debe comparar los costos del sistema propuesto con los de otras alternativas destinadas a mejorar el abastecimiento de agua. Además, es crucial tener en cuenta el impacto que la cantidad de agua tiene en la salud de las personas beneficiadas por el servicio, subrayando la importancia de garantizar un suministro adecuado para las necesidades esenciales.

7.2.3. Factor social

Es importante desde el punto de vista comunitario entender y caracterizar a la comunidad en términos de hábitos y costumbres que puedan afectar la sostenibilidad de la aplicabilidad del sistema. El estudio debe socializar con los usuarios las ventajas y las desventajas de la implementación del sistema frente a un sistema convencional, buscando que la comunidad haga las veces de aliado en una eventual implementación de la tecnología, como se requiere en la Resolución 799 de 2021 del Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio de Colombia.

Es importante recalcar que los hábitos y las costumbres de los usuarios afectan de manera directa los valores de demanda de agua, por lo que se hace necesario hacer “análisis que deben considerar la conveniencia de adoptar soluciones individuales y colectivas, el tipo de material empleado en la fabricación de sus techos, la existencia de materiales alternativos en el lugar o sus alrededores y el grado de participación de la comunidad en la implementación del proyecto.” (Organización Panamericana de la Salud, 2004)

7.3. Costos

La implementación de sistemas de recolección de agua para el abasto de aguas confiables y en cantidades adecuadas, es una estrategia que permite abordar los desafíos relacionados con la gestión y cobertura de agua potable en áreas rurales dispersas, en donde como se ha comentado hay una cobertura considerablemente menor que las áreas urbanas. A medida que esta tecnología se convierte en una solución importante que pueda ser usada en el desarrollo de nuevas viviendas o inclusive en viviendas existentes, surge la necesidad de una evaluación detallada asociada a los costos de implementación y mantenimiento de estos sistemas.

En el presente apartado, se presentarán los parámetros y las consideraciones importantes que deben tenerse en cuenta para formular una ecuación que permita estimar los costos totales involucrados en la implementación y mantenimiento de sistemas de cosecha de



agua para uso doméstico y humano; Tener una ecuación en función de los costos nos permite evaluar de forma precisa la viabilidad económica de la tecnología.

En este proceso de formulación, se consideran diferentes parámetros como los costos de implementación, costos de operación del sistema y costos de mantenimiento en un periodo establecido.

7.3.1. Costos de implementación (C_i)

El análisis de los costos iniciales es fundamental para la implementación de un sistema de recolección de aguas lluvias, como solución a la problemática de cobertura en el suministro de agua potable en zonas rurales. Estos costos tienen en cuenta las inversiones necesarias que se deben realizar en una vivienda (por construir o construida) para la instalación y puesta en marcha de esta tecnología. Este subcapítulo se adentrará el desglose detallado de los costos iniciales para proporcionar una visión clara de las inversiones necesarias, las cuales comprenden los siguientes costos:

Costo de sistema de recolección (C_{rec})

El costo de sistema de recolección es el valor resultante del análisis de los costos de los componentes necesarios para la correcta y eficiente recolección de las aguas lluvias, tales como:

- Canaletas de captación: el costo de la canaleta de captación está en función principalmente del material y la longitud de las canaletas.
- Bajantes con accesorios: el costo de las bajantes se determina en función del diámetro de la tubería, accesorios, material y longitud de los conductos que conducen el agua de la canaleta al almacenamiento.

Ecuación 2. Costo inicial sistema de recolección.

$$C_{rec}(\$) = \text{Costo de canaletas} + \text{costo de bajantes}$$

Costo de pretratamiento (C_{pt})

El costo de pretratamiento analiza los costos de los sistemas de filtración (mallas, filtro de arena, etc) y de interceptor de primeras lluvias, antes de su almacenamiento y posterior bombeo si fuese necesario, los cuales tienen las siguientes consideraciones:

- Sistemas de filtración: la cuantificación de los costos depende principalmente del tipo de filtrado que se pretenda realizar, sin embargo, como mínimo debe tener un filtro de bajante (intercepta hojas y piedras) y un filtro de arenas.
- Interceptor de primeras lluvias: el costo de este componente está dado en función del volumen cuantificado para este tanque.



Ecuación 3. Costo inicial sistema de pretratamiento.

$$C_{pt}(\$) = \sum_{i=1}^n pt_i$$

pt =Costo de sistemas de pretratamiento

n =numero de sistemas de pretratamientos a implementar

Costo de implementación de almacenamiento (C_{alm})

El costo de implementación de tanque de almacenamiento depende del volumen del tanque, si es construido in situ o es prefabricado:

- ✓ in situ

Ecuación 4. Costo implementación de almacenamiento (in Situ).

$$C_{alm}(\$) = C_{materiales} + C_{transporte} + C_{mano\ de\ obra}$$

- ✓ prefabricado

Ecuación 5. Costo implementación de almacenamiento (prefabricado)

$$C_{alm}(\$) = C_{tanque} + C_{transporte} + C_{instalación}$$

Costo implementación de bomba (C_b)

El costo de una bomba para este caso en particular está en función del tipo de bomba, altura, caudal y eficiencia de la bomba, sin embargo, es importante resaltar que las alturas a bombear son relativamente bajas, toda vez que las viviendas rurales se caracterizan por ser de un solo nivel en su gran mayoría.

Así las cosas, los costos de implementación inicial están dados por la siguiente ecuación:

Ecuación 6. Costo de implementación del sistema de recolección de aguas lluvias.

$$C_i(\$) = C_{rec} + C_{pt} + C_{alm} + C_b$$

C_{rec} = Costo de sistema de recolección

C_{pt} = Costo de pretratamiento

C_{alm} =Costo de implementación de almacenamiento

C_b = Costo implementación de bomba

Para la cuantificación de este costo no se tienen en cuenta los costos de cubierta y redes internas de aguas limpias, porque, bien sea para la implementación de un sistema de recolección de aguas lluvias en una vivienda por construir o en una vivienda construida



los costos de la cubierta y de redes internas de distribución de agua limpia es un valor causado, es decir, son valores de componentes que son inherente al costo de la vivienda como tal.

7.3.2. Costos de operación (CO)

Una vez que el sistema de recolección de aguas lluvias esté operando, se presentan los costos de operación mensuales, que abarcan los gastos continuos para mantener el sistema en óptimas condiciones y garantizar su rendimiento a lo largo del tiempo. Estos costos pueden incluir el consumo energético para el funcionamiento de bombas y elementos de desinfección si se consideraron en la implementación del sistema. En este subcapítulo, se analizarán en detalle estos costos operativos, permitiendo una comprensión completa de los gastos sostenibles asociados al uso continuo del sistema.

Costos de consumo energético de la bomba ($CO_{energía}$)

Una vez esté en funcionamiento el sistema de recolección de a aguas lluvias, y de acuerdo a la disposición topológica del sistema podría ser necesario el uso de un sistema de bombeo simple, el cual tendría un consumo de energía que depende de la potencia de la bomba y el tiempo que este encendida la misma. La función de costos dependerá de la tarifa del prestador de energía eléctrica así:

Ecuación 7. Costo de consumo energético de la bomba

$$CO_{energía} = Pot(KW) * t(h) * tarifa \left(\frac{\$}{KW * h} \right)$$

Pot = potencia en kilovatios (kW) que consume la bomba (carga eléctrica).

t = tiempo en horas (h) durante encendida la bomba en un mes.

$tarifa$ = Costo unitario de la energía eléctrica en $\frac{\$}{KW * h}$ (tarifa del prestador del servicio).

Costos de elementos de desinfección

Si en algún punto del sistema de recolección de aguas lluvias se implantan elementos de desinfección de agua como cloro, dióxido de cloro, plata coloidal, o cualquier insumo químico, debe ser incluido en los costos de operación. Teniendo en cuenta que se están caracterizando los costos de operación mensuales se debe cuantificar el costo mensual del insumo usado, así:

Ecuación 8. Costo desinfección

$$CO_{desinfección} = valor\ unitario(\$) * cantidad\ de\ insumo$$

Entonces, los costos propios de la operación del sistema de recolección de aguas lluvias está dado por:



Ecuación 9. Costo de operación del sistema de recolección de aguas lluvias

$$CO(\$) = CO_{energía} + CO_{desinfección}$$

$CO_{energía}$ = Costos de consumo energético de la bomba

$CO_{desinfección}$ = Costos de elementos de desinfección

7.3.3. Costos de mantenimiento (MC)

El mantenimiento adecuado es esencial para garantizar la eficacia y durabilidad de un sistema de recolección de aguas lluvias a lo largo de su ciclo de vida. Los costos de mantenimiento comprenden actividades periódicas como limpieza, reparaciones y reemplazo de componentes, que son esenciales para prevenir problemas y mantener la calidad del agua recolectada.

Costos de mantenimiento sistemas de pretratamiento –filtración (MC_{pt})

Los sistemas de filtraciones requieren un mantenimiento periódico, ya que es el componente que garantiza una correcta calidad de agua para abasto de la vivienda. Los sistemas de filtración tienen gastos asociados con el mantenimiento y reemplazo de los componentes del sistema de filtración, medios filtrantes, materiales filtrantes, que con el tiempo van perdiendo sus capacidades.

Ecuación 10. Costo de mantenimiento sistemas de pretratamiento

$$MC_{pt}(\$) = \sum_{i=1}^n (Mpt_i * t_i)$$

Mpt = Costo de mantenimiento de sistemas de pretratamiento

t = tiempo que se le debe hacer mantenimiento a cada componente

n = número de sistemas de pretratamientos implementados

Costos de inspección y limpieza.

Los costos de inspección y limpieza son los gastos asociados con la limpieza regular y las inspecciones periódicas. Estas actividades son importantes para garantizar el funcionamiento eficiente del sistema y mantener la calidad del agua recolectada. La limpieza implica la eliminación de sedimentos, hojas u otros residuos que puedan acumularse en las superficies de captación y en los tanques de almacenamiento, lo que puede afectar la calidad del agua.

- ✓ Costo de inspección: Las inspecciones incluyen la evaluación de componentes clave, como tuberías, sistemas de filtración y bombas, para detectar posibles



problemas o desgastes que requieran reparación o reemplazo, debe ser realizado por un técnico.

Ecuación 11. Costo de inspección

$$MC_{inspección} = (\text{salario integral}_{MOC} * d)$$

d = días laborados

$\text{salario integral}_{MOC}$ = Salario integral de mano de obra calificada

- ✓ Costo de Limpieza: La limpieza implica la eliminación de sedimentos, hojas u otros residuos que puedan acumularse en las superficies de captación y en los tanques de almacenamiento, lo que puede afectar la calidad del agua, labor que puede ser realizada por mano de obra no calificada.

Ecuación 12. Costo de Limpieza

$$MC_{Limpieza} = (\text{salario integral}_{MONC} * d)$$

d = días laborados

$\text{salario integral}_{MONC}$ = Salario integral de mano de obra no calificada

Entonces los costos de mantenimiento para garantizar un correcto funcionamiento de los componentes del sistema de recolección de aguas lluvias, es:

$$MC(\$) = MC_{pt} + MC_{Limpieza} + MC_{inspección}$$

MC_{pt} = Costos de mantenimiento sistemas de pretratamiento –filtración

$MC_{Limpieza}$ = Costos de limpieza

$MC_{inspección}$ = Costos de inspección



8. NORMATIVA Y REGULACIONES APLICABLES AL ABASTECIMIENTO DE AGUA LLUVIAS

8.1. Normatividad a nivel mundial

En este apartado se presentará una visión mundial de la normatividad aplicable en temas de agua para diferentes países de manera general y simplificada, la cual se relaciona por países en la siguiente tabla:

Tabla 15. Normatividad: Visión Mundial.

País	Derecho al Agua Potable	Uso de Aguas Pluviales	Normativa Principal
Estados Unidos	El derecho al agua está implícito en diversas leyes y regulaciones a nivel federal y estatal, incluyendo la Ley de Agua Limpia (Clean Water Act) y la Ley de Agua Potable Segura (Safe Drinking Water Act).	La regulación del uso de aguas pluviales varía según los estados y las municipalidades. Algunas jurisdicciones promueven la captura y uso sostenible de aguas pluviales.	Clean Water Act, Safe Drinking Water Act, regulaciones estatales y locales.
Unión Europea	El derecho al agua potable está reconocido como un derecho humano fundamental. La Directiva Marco del Agua establece un marco para la gestión sostenible del agua.	La gestión de aguas pluviales se aborda a través de la Directiva de Aguas Urbanas y otras normativas locales.	Directiva Marco del Agua, Directiva de Aguas Urbanas.
Brasil	La Constitución Federal garantiza el derecho al agua. La Ley de Aguas regula la gestión de los recursos hídricos.	El uso de aguas pluviales está regulado por la legislación ambiental y las normativas locales.	Ley de Aguas (Lei das Águas), normativas ambientales locales.
Australia	Australia reconoce el acceso al agua como un derecho esencial. La Ley del Agua Nacional y las regulaciones estatales gestionan el uso sostenible del agua.	Las regulaciones varían por estado, pero algunos promueven la captura y el uso de aguas pluviales.	Ley del Agua Nacional, regulaciones estatales.

8.2. Colombia

En esta sección se presentará la normativa colombiana referente al abastecimiento de agua, la utilización de agua de lluvia, las restricciones e incentivos existentes, la calidad del agua, su aplicación en uso doméstico, de consumo y otras áreas, la cual se relacionará en la siguiente tabla:



Tabla 16. Normatividad en materia de abastecimiento y aguas lluvias: Colombia

Normatividad	Título	Contenido
Decreto 1541 De 1978	<p>Por el cual se reglamenta la Parte III del Libro II del Decreto-Ley 2811 de 1974: "De las aguas no marítimas" y parcialmente la Ley 23 de 1973."</p> <p>Título VII Régimen de ciertas categorías especiales de aguas</p> <p>Capítulo I Aguas lluvias</p>	<p>El propietario, poseedor o tenedor de un predio tiene el derecho de utilizar las aguas lluvias sin necesidad de concesión, siempre y cuando estas fluyan naturalmente a través de varios terrenos o salgan de un inmueble, manteniendo su carácter de dominio público. La construcción de infraestructuras para almacenar, conservar y dirigir las aguas pluviales está permitida, siempre que no cause perjuicios a terceros.</p>
Ley 142 De 1994	<p>Por la cual se establece el régimen de los servicios públicos domiciliarios y se dictan otras disposiciones.</p>	<p>La Ley 142 de 1994 en Colombia establece el marco regulatorio para los servicios públicos domiciliarios, incluyendo el suministro de agua potable. Esta legislación promueve la participación del sector privado y la competencia en la prestación de servicios, garantizando la calidad, continuidad y accesibilidad de los mismos para los usuarios. Asimismo, establece los derechos y deberes de los usuarios, regula la tarificación de los servicios y crea organismos de control y supervisión para asegurar el cumplimiento de normativas y la eficiencia en la gestión de los servicios de agua potable.</p>
Resolución 2115 de 2007	<p>Por medio de la cual se señalan características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano.</p>	<p>Esta resolución establece los criterios mínimos de calidad dependiendo el uso que se le vaya a dar al recurso agua, así mismo establece cuales son los parámetros físico químicos y microbiológicos que se deben cumplir en Colombia en cuanto a calidad de Agua.</p>



Sentencia T-740/11	DERECHO FUNDAMENTAL AL AGUA- Concepto y fundamento	<p>El agua, según el Comité de Derechos Económicos, Sociales y Culturales, se reconoce como un derecho fundamental que implica el acceso a agua suficiente, saludable, aceptable, accesible y asequible para uso personal o doméstico. Este derecho es esencial para la existencia humana y se presenta en Colombia con una doble connotación: como derecho fundamental y como servicio público. En este contexto, todas las personas deben tener acceso al servicio de acueducto en condiciones de cantidad y calidad adecuadas, siendo responsabilidad del Estado organizar, dirigir, reglamentar y garantizar su prestación bajo los principios de eficiencia, universalidad y solidaridad.</p>
Decreto 1898 De 2016	<p>Por el cual se adiciona el Título 7, Capítulo 1, a la Parte 3, del Libro 2 del Decreto 1077 de 2015, que reglamenta parcialmente el artículo 18 de la Ley 1753 de 2015, en lo referente a esquemas diferenciales para la prestación de los servicios de acueducto, alcantarillado y aseo en zonas rurales</p>	<p>se definen términos clave, como abasto de agua, administrador de punto de suministro, aportes, dispositivos de tratamiento de agua, esquema asociativo, esquema diferencial, instalaciones sanitarias, entre otros, para clarificar su interpretación en el contexto de este decreto</p>
Resolución 0330 - 2017	<p>Por la cual se adopta el Reglamento Técnico para el Sector Agua Potable y Saneamiento Básico – RAS y se derogan las resoluciones 1096 de 2000, 0424 de 2001, 0668 de 2003, 1459 de 2005 y 2320 de 2009.</p>	<p>La Resolución reglamenta los requisitos técnicos que se deben cumplir en las etapas de diseño construcción, puesta en marcha, operación, mantenimiento y rehabilitación de la infraestructura relacionada con los servicios públicos de acueducto, alcantarillado y aseo.</p>
Decreto 1272 De 2017	<p>Por el cual se adiciona el Capítulo 2, al Título 7, de la Parte 3, del Libro 2 del Decreto 1077 de 2015</p>	<p>reglamenta parcialmente el artículo 18 de la Ley 1753 de 2015, en lo referente a esquemas diferenciales para la prestación de los servicios de acueducto, alcantarillado y aseo en zonas de difícil acceso, áreas de difícil</p>



		gestión y áreas de prestación, en las cuales por condiciones particulares no puedan alcanzarse los estándares de eficiencia, cobertura y calidad, establecidos en la ley.
Resolución 844 De 2018	Por la cual se establecen los requisitos técnicos para los proyectos de agua y saneamiento básico de zonas rurales que se adelanten bajo los esquemas diferenciales definidos en el Capítulo 1, del Título 7, de la Parte del Libro 2 del Decreto número 1077 de 2015.	Reglamento técnico que flexibiliza los parámetros técnicos de diseño de soluciones de infraestructura colectivas e individuales, teniendo en cuenta las condiciones particulares de cada una de las comunidades enmarcadas en las leyes de esquemas diferenciales, garantizando la participación comunitaria en todas las etapas de los proyectos.
Resolución 799 De 2021	Por la cual se modifica la Resolución 0330 de 2017	La Resolución reglamenta los requisitos técnicos que se deben cumplir en las etapas de diseño construcción, puesta en marcha, operación, mantenimiento y rehabilitación de la infraestructura relacionada con los servicios públicos de acueducto, alcantarillado y aseo.



8.3. Calidad de agua potable

En Colombia la resolución 2115 de junio de 2007 señala las características para la calidad del agua desde el punto de vista organoléptico, físico, químico y microbiológico para que pueda ser consumida por la población humana sin producir efectos adversos a la salud, las cuales se relacionan en la siguiente tabla:

Tabla 17. Características fisicoquímicas del agua para consumo humano (Avellaneda Franco, 2020)

	Características	Unidades	Valor
Características físicas (Art. 5, Res 2115, 2007)	Color aparente	Unidad de platino cobalto	15
	Olor y Sabor	Aceptable o no aceptable	Aceptable
	Turbiedad	Unidades nefelometrías de turbiedad (UNT)	2
Características Químicas que tienen reconocido efecto adverso en la salud humana (Art. 5, Res 2115, 2007)	Antimonio	Sb	0,02
	Arsénico	As	0,01
	Bario	Ba	0,7
	Cadmio	Cd	0,003
	Cianuro libre y disociable	CN-	0,05
	Cobre	Cu	1,0
	Cromo total	Cr	0,05
	Mercurio	Hg	0,001
	Níquel	Ni	0,02
	Plomo	Pb	0,01
	Selenio	Se	0,01
	Trihalometanos	THMs	0,2
	Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAP)	HAP	0,01
Características Químicas que tienen implicaciones sobre la salud humana (Art 6 , Res 2115, 2007))	Carbono Orgánico	COT	5,0
	Nitritos	NO ₂ ⁻	0,1
	Nitratos	NO ₃ ⁻	10
	Fluoruros	F ⁻	1,0
Características químicas que tienen consecuencias económicas e indirectas sobre la salud humana. (Art. 5, Res 2115, 2007)	Calcio	Ca	60
	Alcalinidad Total	CaCO ₃	200
	Cloruros	Cl ⁻	250
	Aluminio	Al ³⁺	0.2
	Dureza Total	CaCO ₃	300
	Hierro Total	Fe	0.3
	Magnesio	Mg	36
	Manganeso	Mn	0.1
	Molibdeno	Mo	0.07
	Sulfatos	SO ²⁻	250
	Zinc	Zn	3
Fosfatos	PO ₄ ³⁻	0.5	



9. CASOS DE ESTUDIO

Este capítulo se enfoca en evaluar la viabilidad y eficacia de los sistemas de recolección de aguas pluviales como una solución sostenible para abordar la escasez de agua en zonas rurales dispersas. El objetivo principal es realizar una evaluación detallada que permita comprender el potencial y las limitaciones de la cosecha de aguas lluvias como alternativa para el abastecimiento de agua potable, contrastando los resultados en dos localidades diferentes: Quibdó e Istmina, municipios del departamento del Chocó, ambos caracterizados por un alto nivel de precipitación.

Los datos utilizados en este estudio corresponden a registros de precipitación recopilados entre enero de 2004 y noviembre de 2024, provenientes de las estaciones meteorológicas de Aeropuerto El Caraño (Quibdó) [11045010]² E Istmina [54010010]³ que son instaladas por Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). Estos municipios fueron seleccionados debido a sus condiciones climáticas, aunque ambas zonas presentan regímenes de lluvia distintos, aunque para ambos casos la cantidad de lluvia es considerable, de las mayores del mundo como se comenta en capítulos anteriores. Sin embargo, ambos casos comparten el reto común de enfrentar dificultades en el acceso al agua potable tanto en calidad, cantidad y cobertura, especialmente en sus áreas rurales dispersas.

El enfoque de este estudio está orientado a implementar una metodología para el diseño de sistemas de cosecha de agua de lluvia y considerando las particularidades climáticas. En este capítulo se explorarán dos escenarios de diseño, que serán desarrollados más detalladamente en los apartes correspondientes. Estos escenarios contemplan tanto el diseño de un sistema para una vivienda nueva en un contexto rural disperso, como la adaptación de un sistema para una vivienda existente, con el objetivo de optimizar el aprovechamiento de las aguas lluvias y asegurar el abastecimiento de agua potable.

La vivienda utilizada como parámetro para estos estudios será la Vivienda de Interés Social Rural del Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, que servirá como modelo para estos escenarios. Entonces, este análisis busca, aportar información valiosa sobre la implementación de sistemas de cosecha de aguas lluvias en áreas rurales dispersas, proporcionando soluciones adaptadas a las condiciones locales y contribuyendo al mejoramiento del acceso al agua potable en zonas de alta precipitación.

9.1. Descripción de vivienda tipo: Vivienda de interés social rural

Para la implementación del estudio se establecieron áreas representativas en términos de condiciones climáticas y de infraestructura, considerando la utilización de una estructura de control estandarizada. Se optó por utilizar la Vivienda de Interés Social Rural de

² Código asignado por el IDEAM para identificar la estación de Quibdó

³ Código asignado por el IDEAM para identificar la estación de Istmina



tipología en T del Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio (Departamento Nacional de Planeación , 2023) y adoptada principalmente por el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural para mejorar las condiciones de habitabilidad de las familias rurales en Colombia con déficit cualitativo y cuantitativo de vivienda, esta vivienda se esquematiza en la Ilustración 27 y en la Ilustración 28.

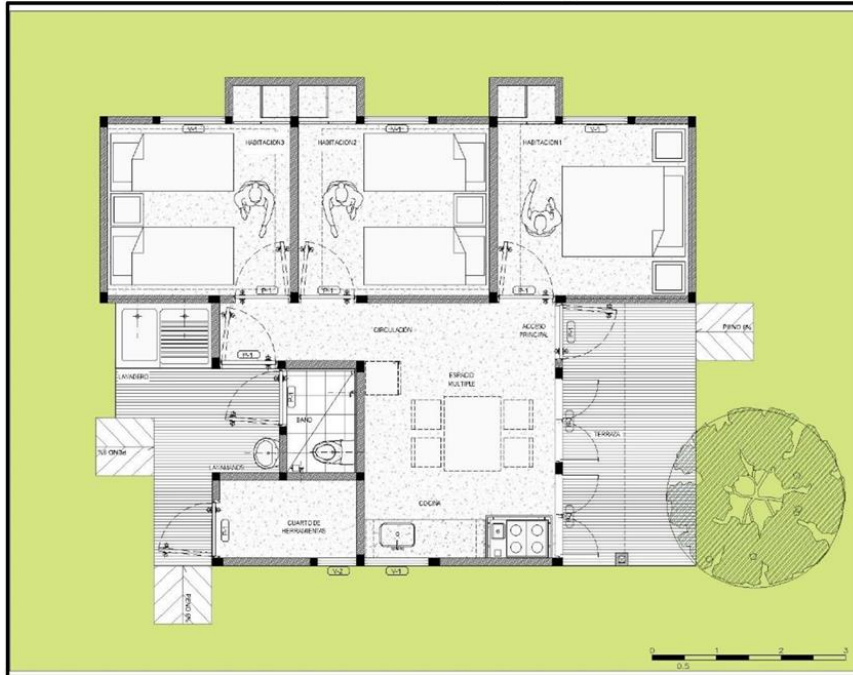


Ilustración 27. Planta Tipología “T” VRST - Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio (2021).



Ilustración 28. Isometría Tipología en “T” VRST - Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio (2021).

Sin embargo, a pesar de que es un modelo de vivienda que se diseñó para condiciones de ruralidad en Colombia, no se tuvo en cuenta sistemas abastecimiento de agua potable; teniendo en cuenta que uno de los criterios habilitantes para la presentación de este



proyecto por parte de las entidades municipales es “Certificado de disponibilidad de servicios públicos: expedido en este caso por las empresas proveedora del servicio de acueducto” (Departamento Nacional de Planeación (DNP), 2017), no obstante, en el documento tipo de 2023 del DNP se reconoce que la generalidad de la zona rural es no contar con conexión a los servicios públicos, por lo tanto permiten que se implementen sistemas alternativos de acceso a agua potable (Departamento Nacional de Planeación , 2023). Esta consideración, aporta al éxito de estos programas porque como se logra vislumbrar en el capítulo 3, numeral 3.2 Cobertura de abastecimiento de agua potable de este documento.



Ilustración 29. Vivienda de Interés Social Rural – (fuente: <https://minvivienda.gov.co/vivienda-de-interes-social-sqr/vivienda-de-interes-social-rural>)

la Vivienda de Interés Social Rural tipo sirvió como base para la evaluación de la recolección de aguas pluviales en zonas rurales en diferentes condiciones de alta precipitación y tiene las siguientes especificaciones técnicas:

Tabla 18. Área Tipología VRST- Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio (2021).

<i>Cuadro de áreas</i>	<i>m²</i>
<i>Comedor – Cocina</i>	3,95
<i>Alcoba 1</i>	8,41
<i>Alcoba 2</i>	8,41
<i>Alcoba 3</i>	8,09
<i>Espacio múltiple</i>	5,2
<i>Baño (sanitario y ducha)</i>	1,74
<i>Baño (lavamanos)</i>	0,74
<i>Deposito</i>	2,57
<i>Circulación</i>	5,06
<i>Muros</i>	6,37
<i>Terraza</i>	3,8
<i>Total</i>	54,34

Esta tipología VRST es un modelo compacto cuyo diseño logra una máxima eficiencia entre muros y espacios internos. La configuración espacial responde a dos volúmenes,



uno que agrupa las habitaciones y en el otro que agrupa los demás espacios del programa. (Departamento Nacional de Planeación , 2023)

Para el desarrollo del diseño, se realizaron modificaciones al modelo inicial, comenzando con el cambio en la orientación de la cubierta. En lugar de dirigir el flujo de aguas pluviales hacia los extremos, se optó por redirigirlas hacia el centro de la vivienda. Esta modificación reduce la longitud de la canaleta necesaria para la captación de las aguas lluvias, lo que optimiza el sistema de recolección, como se ilustra en la Ilustración 30. Además, se decidió incorporar un tanque elevado de 250 litros haciendo que únicamente varié el almacenamiento del tanque inferior, cuyo único propósito es proporcionar presión al sistema hidráulico de la vivienda. Esta medida responde a la necesidad de garantizar un adecuado flujo de agua en la ducha, considerando la altura de los accesorios como el punto crítico del sistema.

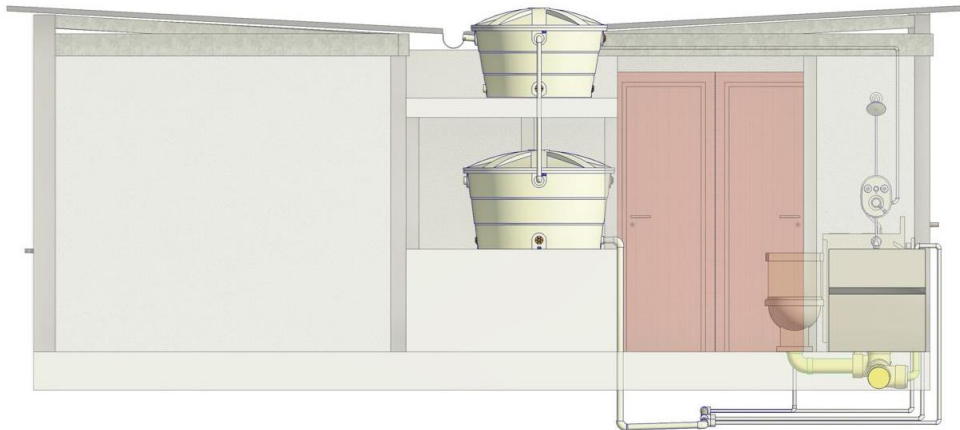


Ilustración 30. Corte Transversal vivienda modificada - fuente propia 2024 (REVIT)

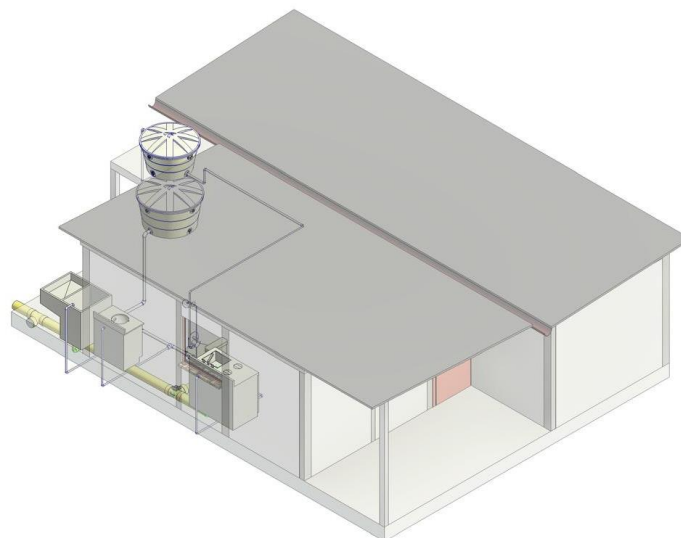


Ilustración 31. Isometría vivienda modificada - fuente propia 2024 (REVIT)

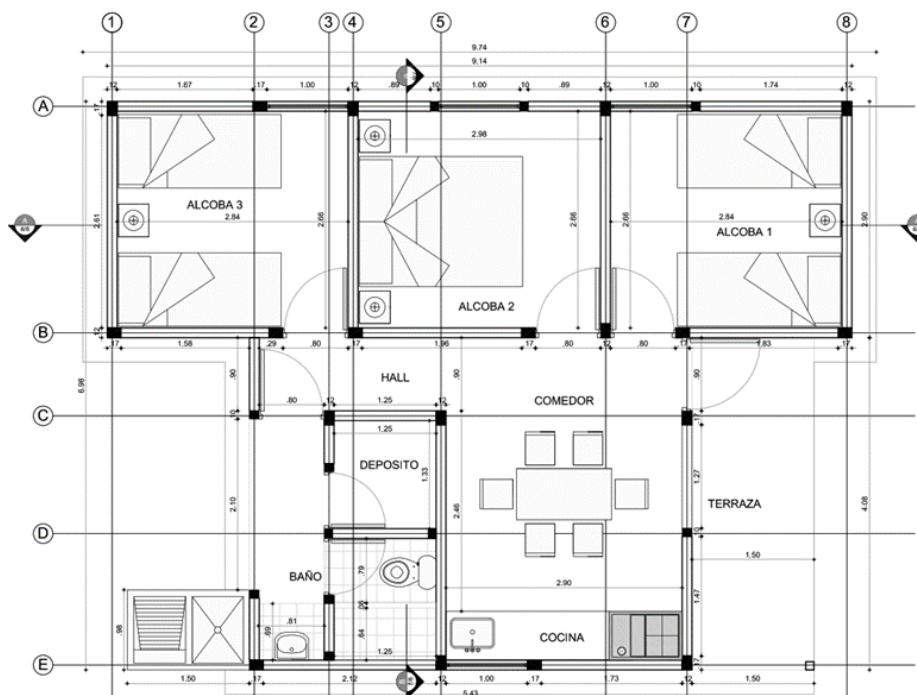


Ilustración 32. Planta arquitectónica Tipología en “T” VRST

A continuación, se presentan las especificaciones técnicas de la vivienda que se utiliza como parámetro para el diseño y evaluación del sistema de cosecha de aguas lluvias en esta investigación, la cual es una variante de Vivienda de Interés Social Rural tipología T presentada por el Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio.

Tabla 19. Especificaciones técnicas vivienda parámetro de la investigación

Elemento	Cantidad	Observación
N° de habitaciones	3	Habitabilidad para entre 4 y 6 habitantes
Cocina:	1	Cocina abierta
Baño	1	lavamanos separado de sanitario.
Sistema séptico	1	Tanque séptico
Área cubierta	54.34 m ²	
Área de techo	63.59 m ²	
Tipo de material	1	Mampostería y concreto reforzado
Material cubierto	1	zinc o similar

9.2. Metodología

En este punto se presenta el enfoque metodológico utilizado para llevar a cabo el estudio de abastecimiento de agua potable en zonas rurales dispersas a partir de la recolección de aguas lluvias, empleando datos climatológicos disponibles en la red de datos abiertos del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) estaciones



Istmina [5401001] y Aeropuerto el Caraño [11045010], ubicadas en los municipios de Istmina y Quibdó respectivamente.

9.2.1. Datos de Precipitación

Para el diseño de un sistema de captación o cosecha de aguas lluvias para el aprovechamiento del recurso es fundamental conocer el régimen hidrológico de la región donde se va a desarrollar el estudio de caso. El sistema debe estar basado en los datos de precipitación mensual que reporte para la región el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM, con base en registros históricos de por lo menos 10 años, según recomendaciones de varias fuentes bibliográficas consultadas. El hecho de analizar datos superiores a 10 años permite que en el análisis se contemplen periodos de largas sequías y periodos de lluvias intensas en la región.

Para el estudio de caso se recopila la información de precipitación mensual de las estaciones relacionadas en la Tabla 20, operadas por el IDEAM. Para el desarrollo del estudio se extrajo la precipitación diaria desde el 01 de enero del año 2004 hasta el 11 de diciembre del año 2024, es decir se cuenta con un registro histórico de más de 20 años.

Tabla 20. Estaciones Climatológicas empleadas - IDEAM 2024

Nombre Estación	Latitud	Longitud	Altitud	fecha de datos		Nivel de aprobación
ISTMINA [54010010]	5.158750	-76.6892222220	78	1/01/2004	11/11/2024	1200
AEROPUERTO EL CARANO [11045010]	5.69055556	-76.6437778	75	1/01/2004	11/11/2024	1200

El IDEAM en su banco de datos “constituye información de tres clases por nivel de aprobación así: preliminar, en revisión, y definitivo” (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), 2019).

Tabla 21. Descripción de nivel de aprobación

Preliminar – 900
En revisión - 1100
Definitivo - 1200

De acuerdo a lo establecido en la Tabla 21. Descripción de nivel de aprobación, “los datos que se encuentran en nivel de aprobación “definitivo” podrán utilizarse para la toma de decisiones como quiera que han agotado el proceso de validación que garantiza la calidad del dato” (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), 2019). Los datos que se usan en el estudio de caso tienen un nivel de aprobación “definitivo”, lo que sugiere que son datos revisados y corroborados por el IDEAM.



9.2.2. Procesamiento de información meteorológica

Una vez obtenida la serie de datos de precipitación diaria de las estaciones Istmina y Aeropuerto el Caraño, se procede a revisar la información suministrada, determinando datos faltantes y valores atípicos, para poder obtener los valores de precipitación media mensual multianual (2004 al 2024).

Valores atípicos

Los valores atípicos en una serie de datos se pueden detectar mediante la aplicación de conceptos estadísticos. *“Esto se logra más fácilmente transformando los datos en puntajes z. El puntaje z es un valor estadístico que mide la diferencia entre un estadístico observado y su parámetro hipotético de población en unidades de error estándar. Si se asume una distribución normal, aproximadamente el 99% de las puntuaciones se encontrarán dentro de 3 desviaciones estándar de la media. Por lo tanto, cualquier valor z mayor que +3.00 o menor que -3.00 indica un valor improbable, y el caso debe considerarse un valor atípico”* (Avellaneda Franco, 2020, pág. 161)

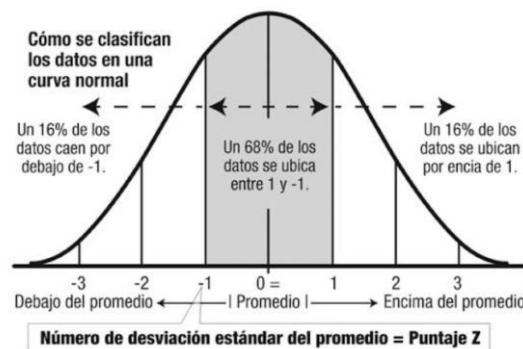


Ilustración 33. Representación puntaje Z. (Avellaneda Franco, 2020)

Sin embargo, en este caso particular de datos de precipitación diaria en Colombia, donde la estacionalidad climática puede ser menos pronunciada o incluso variable, existen argumentos válidos para no aplicar estrictamente el criterio de valores atípicos u outliers como se haría en otros contextos climáticos más estables. En países del trópico y especialmente en Colombia con contextos geográficos diversos, la variabilidad de la precipitación es alta lo cual necesariamente no represente un valor atípico. Estas consideraciones se acentúan teniendo en cuenta la variabilidad climática resultante del cambio climático en el planeta tierra.

En conclusión, no se aplicará estrictamente el criterio de valores atípicos en la serie de datos de la precipitación en los 7650 días de cada una de las estaciones, teniendo en cuenta la variabilidad natural de la climatología colombiana considerando eventos extremos.



Valores faltantes

En una serie de datos que son el resultado de patrones que tienen instrumentación, es frecuente encontrar datos faltantes en el registro de la información, por cualquier razón de naturaleza humana o computacional, sin embargo, es imperativo implementar alguna metodología para estimar los datos faltantes si se tienen registros anteriores, posteriores y/o del dato faltante en circunstancias similares (mismo día de años anteriores y posteriores). Una manera de hacerlo teniendo en cuenta la gran cantidad de datos, que se conocen los datos anteriores a las fechas de ausencia de datos y que se analizan diferentes años de la misma estación es procedente utilizar el método de interpolación o combinación lineal ponderada que consiste en sustituir la falta de datos a partir de los datos de series estadísticamente próximas, que son conocidas como vecinas.

Otra alternativa sería establecer un polígono utilizando la información de estaciones pluviométricas cercanas, lo que permitiría abarcar un área geográfica más amplia. A partir de esta base, se podrían aplicar diversas herramientas estadísticas, tales como ponderación, interpolación y promedios, para estimar valores faltantes y obtener una representación más precisa de los datos de precipitación en zonas cercanas. Este enfoque mejora la calidad de la información al considerar las variaciones espaciales de las estaciones cercanas, lo que ayuda a reducir posibles sesgos y asegura una estimación más confiable de las precipitaciones en áreas sin datos directos.

9.2.3. Criterios de diseño

En este apartado se especifican los criterios y procedimientos para el diseño de un sistema de cosecha de aguas lluvias para la vivienda de control descrita en el numeral anterior, teniendo en cuenta dos regímenes de lluvias obtenidos de los datos de precipitación del IDEAM para el municipio de Istmina y Quibdó en el departamento del Chocó, con el objetivo de identificar y analizar la capacidad del sistema de recolección de aguas lluvias

En este método se pretende calcular la capacidad del sistema de recolección de aguas lluvias y el volumen de almacenamiento, para lo cual necesitamos como datos de entrada:

- ✓ Área de Captación
- ✓ Coeficiente de Escorrentía (Material del techo)
- ✓ Número de usuarios de la vivienda
- ✓ Precipitación promedio diaria
- ✓ Precipitación Promedio mensual
- ✓ Designación de la dotación
- ✓ Determinación de la demanda
- ✓ Determinación de la oferta diaria
- ✓ Determinación de la oferta mensual
- ✓ Determinación del volumen de almacenamiento



Procedimiento de diseño

Se describirá el proceso necesario para el diseño de un sistema de cosecha de agua

Área de captación

Para este caso en particular el área de captación ya está definida, la cual corresponde a la sumatoria de las dos áreas de la Ilustración 34, 63.59 m² extraído del cálculo área de cubierta - Vivienda de interés Social Rural .

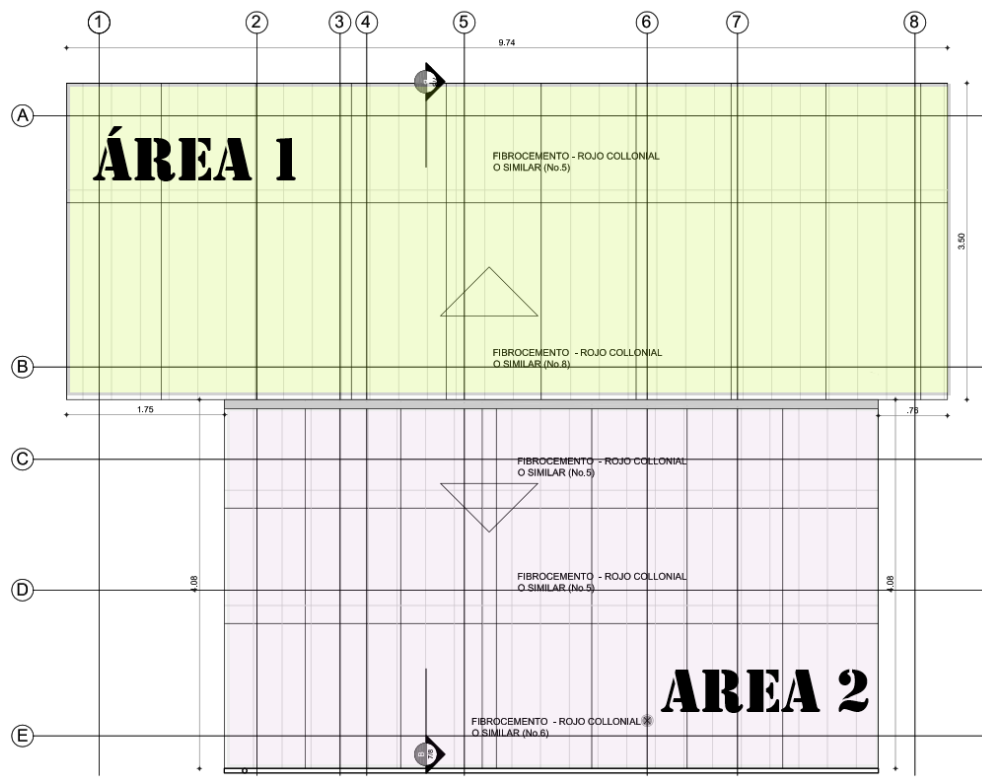


Ilustración 34. área de cubierta - Vivienda de interés Social Rural (Departamento Nacional de Planeación (DNP), 2017)

Coefficiente de Escorrentía

El coeficiente de escorrentía representa la fracción de agua del total de lluvia precipitada que realmente genera escorrentía superficial. Su valor depende de las características concretas de la superficie que determinan la infiltración del agua en el material. (Ibáñez Asensio, Moreno Ramón, & Gisbert Blanquer, 2009).

En el diseño a pesar de que las cubiertas de las edificaciones son de materiales muy impermeables es recomendable tener en cuenta el coeficiente de escorrentía que es función del material del techo o terraza de la edificación. (Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico - Título J, 2010)



Tabla 22. Coeficiente de escorrentía para diferentes materiales (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010)

MATERIAL	COEFICIENTE DE ESCORRENTÍA (C)
Teja de lámina plástica	0.9
Lámina metálica galvanizada	0.9
Teja de Asbesto cemento	0.9
Teja de arcilla cocida	0.8 – 0.9
Madera	0.8
Paja	0.6 – 0.7
Pisos cementados	0.9
Piso pavimentado con ladrillo	0.8

Para el caso de la vivienda modelo, en **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se puede observar que el material de la cubierta es de fibrocemento o similar, las características de permeabilidad son parecidas a las del asbesto cemento adoptaremos un coeficiente de escorrentía de 0.9.

Número de usuarios de la vivienda

La vivienda modelo de diseño está diseñada para un total de entre 4 y 6 usuarios como se puede observar en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** sin embargo, Departamento Administrativo Nacional de Estadística –DANE establece que para zonas rurales el promedio de habitantes es de 4.2, entonces se tomara un valor de 5 habitantes por vivienda.

Precipitación promedio diaria

El valor de la precipitación promedio diaria se calcula promediando los eventos de precipitación de cada uno de los días a lo largo de los 23 años de estudio, lo que arrojará un total de 366 valores, considerando los 6 años bisiestos dentro del período comprendido entre 2000 y 2022.

Este cálculo proporcionará un entendimiento más completo de la distribución y la cantidad promedio de precipitación por día a lo largo de un amplio período de tiempo. Lo que será de gran ayuda para cuantificar y entender los almacenamientos de agua necesarios.

Ecuación 13. Estimación precipitación promedio diaria

$$P_{dk} = \frac{\sum_k^n P_k}{n}$$

P_{dk} : Precipitación promedio diaria del día “k” para todos los años (mm)

P_k : valor de Precipitación del día “k”

n : número de años evaluados



Para los días 29 de febrero que solo se presentan los años bisiestos, es decir, para los años 2000, 2004, 2008, 2012, 2016, 2020, se debe establecer la precipitación con la siguiente ecuación:

Ecuación 14. Estimación precipitación promedio diaria para 29 de febrero.

$$P_{dk'} = \frac{\sum_{k'}^n P_{k'}}{n}$$

$P_{dk'}$: Precipitación promedio diaria del día 29 de febrero.

$P_{k'}$: valor de Precipitación del día 29 de febrero de cada uno de los años bisiestos evaluados

n : número de años bisiestos

Precipitación Promedio mensual

a partir de los datos promedio mensuales de precipitación de los 23 años se obtiene el valor promedio mensual del total de años evaluados. Este valor puede ser expresado en mm, litros/m², capaz de ser recolectado en la superficie horizontal del techo en un mes. (Organización Panamericana de la Salud, 2004)

Ecuación 15. Estimación precipitación promedio mensual

$$P_{di} = \frac{\sum_i^n P_i}{n}$$

P_{di} : precipitación promedio mensual del mes “i” de todos los años evaluados (mm)

P_i : valor de precipitación mensual del mes “i”, (mm)

n : número de años evaluados

Designación de la dotación

“La dotación neta debe determinarse haciendo uso de información histórica de los consumos de agua potable de los suscriptores, disponible por parte de la persona prestadora del servicio de acueducto o, en su defecto, recopilada en el Sistema Único de Información (SUI) de la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios (SSPD), siempre y cuando los datos sean consistentes.” (RESOLUCIÓN 330 DE 2017, 2017)

Tabla 23. Dotación neta máxima por habitante según la altura sobre el nivel del mar de la zona atendida - RES 0330 de 2017

ALTURA PROMEDIO SOBRE EL NIVEL DEL MAR DE LA ZONA ATENDIDA	DOTACIÓN NETA MÁXIMA (L/HAB*DÍA)
> 2000 m s. n. m.	120



1000 – 2000 m s. n. m.	130
< 1000 m s. n. m.	140

Teniendo en cuenta que existe una normatividad enfocada específicamente en proyectos de agua y saneamiento básico de zonas rurales de Colombia y sugiere que los valores de dotación neta deberían encontrarse entre 20 l/hab*día y 200 l/hab*día diferenciando el volumen para atender las necesidades de consumo humano, las domésticas y las de subsistencia de la familia rural. (MINISTERIO DE VIVIENDA, CIUDAD Y TERRITORIO, 2018). Por otro lado, La Organización Mundial para la Salud (OMS) en su informe sobre la cantidad de agua domiciliaria, el nivel del servicio y la salud señaló que la cantidad de agua mínima que una persona necesita para la satisfacción de las necesidades básicas es de 50 y 100 litros de agua al día por persona. En tiempo de crisis o emergencia, deben garantizarse por lo menos 15 litros de agua por persona. (Carvajal, y otros, 2019).

Así las cosas, y teniendo en cuenta todas las consideraciones de cantidades suficiente de agua se tomarán los valores máximos de referencia de la Tabla 23. Dotación neta máxima por habitante según la altura sobre el nivel del mar de la zona atendida - RES 0330 de 2017, para el caso de Quibdó al estar ubicado a 75 m.s.n.m. se utilizará una dotación de 140 l/hab*día y para Istmina ubicado a 76 m.s.n.m le corresponde una dotación de 140 l/hab*día

Determinación de la demanda

a partir de la dotación asumida por persona se calcula la cantidad de agua necesaria para atender las necesidades de la familia o familias a ser beneficiadas en cada uno de los meses. (Organización Panamericana de la Salud, 2004)

Ecuación 16. Determinación de la demanda

$$D_i = \frac{Nu * Nd_i * Dot}{1000}$$

D_i : Dotación mes “i” (m³)

Nu : número de habitantes de la vivienda

Nd_i : Número de días del mes “i”

Dot : dotación (l/hab*día)



Determinación de la oferta diaria

Teniendo en cuenta los promedios diarios de precipitaciones de todos los años evaluados, el material del techo y el coeficiente de escorrentía, se procede a determinar la cantidad de agua captada para diferentes áreas de techo y por día.

Ecuación 17. Determinación de la oferta diaria

$$V_k = \frac{P_k * C * A}{1000}$$

V_k : Oferta hídrica día “k”

P_k : precipitación promedio día “k” (lit/m²)

C : Coeficiente de escorrentía

A : Área m²

Determinación de la oferta mensual

Partiendo de que se conocen los promedios mensuales de precipitaciones de todos los años evaluados, el material del techo y el coeficiente de escorrentía, se procede a determinar la cantidad de agua captada para diferentes áreas de techo y por mes.

Ecuación 18. Determinación de la oferta mensual

$$V_i = \frac{P_i * C * A}{1000}$$

V_i : Oferta hídrica mes “i”

P_i : precipitación promedio mes “i” (lit/m²)

C : Coeficiente de escorrentía

A : Área m²

Determinación del volumen de almacenamiento

Teniendo como base los valores obtenidos en la determinación de la demanda mensual de agua y oferta mensual de agua de lluvia, se procede a calcular el acumulado de cada uno de ellos mes a mes encabezado por el mes de mayor precipitación u oferta de agua y teniendo en cuenta el volumen del primer lavado. A continuación, se procede a calcular la diferencia de los valores acumulados de cada uno de los meses de la oferta y la demanda respectivamente.

Adicionalmente se realizará un análisis teniendo en cuenta los 366 valores diarios obtenidos, mediante un modelo de balance hídrico en el tanque.



9.3. Diseño del Sistema

En este apartado se abordará el diseño del sistema de cosecha de aguas lluvias para viviendas rurales dispersas, considerando dos escenarios diferentes. El primer escenario se centra en el diseño de un sistema para una vivienda nueva, donde se conocerán factores como el régimen de lluvias, número de habitantes y consumos diarios, y se determinarán el área de captación mínima y el volumen de almacenamiento requerido. El segundo escenario corresponde a la adaptación de un sistema para una vivienda existente, donde, además de los mismos factores, se contará con la información sobre el área y material de la cubierta, y se evaluará la optimización del área de captación y el dimensionamiento del almacenamiento. Estos dos casos permitirán evaluar distintas aproximaciones al diseño de sistemas de cosecha de aguas lluvias en contextos rurales específicos.

9.3.1. Escenario 1: Diseño de Sistema de Cosecha de Aguas Lluvias para Vivienda Rural Nueva

En este escenario, el objetivo es determinar el área mínima de la cubierta y el volumen de almacenamiento necesaria para garantizar un suministro adecuado de agua potable mediante la recolección de aguas lluvias en una vivienda rural nueva. Para ello, se consideran varios factores: el régimen de lluvias de la zona, el coeficiente de escorrentía según el material de la cubierta, el número de usuarios en la vivienda y la dotación de agua, tal como lo establece la Resolución 844 de 2018 para zonas rurales de Colombia.

El proceso comienza con la recolección de los datos iniciales, que incluyen el régimen de lluvias obtenido de las estaciones meteorológicas a estudiar, para este caso las estaciones de Istmina y Quibdó en el departamento del Chocó, el coeficiente de escorrentía de acuerdo con el material de la cubierta, el número de usuarios y la dotación de agua por persona. Con estos datos, se determina inicialmente el área de captación, que se supone como el área de la cubierta proyectada en el diseño arquitectónico de la vivienda.

A partir de esta área, se calcula el volumen de agua que se puede recolectar y el volumen necesario para el almacenamiento, teniendo en cuenta la variabilidad estacional de las precipitaciones y la demanda de agua de los usuarios. Luego, se realiza un proceso iterativo: se ajusta el área de captación y el volumen de almacenamiento hasta que no se genere un déficit de agua durante los períodos secos del año. Si el volumen de agua almacenada no es suficiente para cubrir la demanda, se aumenta el área de captación o el volumen de almacenamiento, repitiendo el proceso hasta lograr una combinación que garantice un suministro adecuado.

Para optimizar el diseño, se introduce una función objetivo que busca minimizar el costo de almacenamiento. Como se analizó previamente, el almacenamiento y tratamiento de grandes volúmenes de agua conllevan mayores costos, por lo que se busca una combinación eficiente de área de captación y volumen de almacenamiento que minimice estos costos. Esto permite obtener un sistema eficiente, garantizando que el agua



recolectada sea suficiente para cubrir las necesidades de la vivienda sin generar gastos innecesarios.

Finalmente, se evalúa el sistema en función de la eficiencia y los costos, ajustando tanto el área de captación como el volumen de almacenamiento para lograr el diseño más adecuado para una vivienda rural nueva, garantizando un abastecimiento de agua potable durante todo el año sin incurrir en costos elevados.

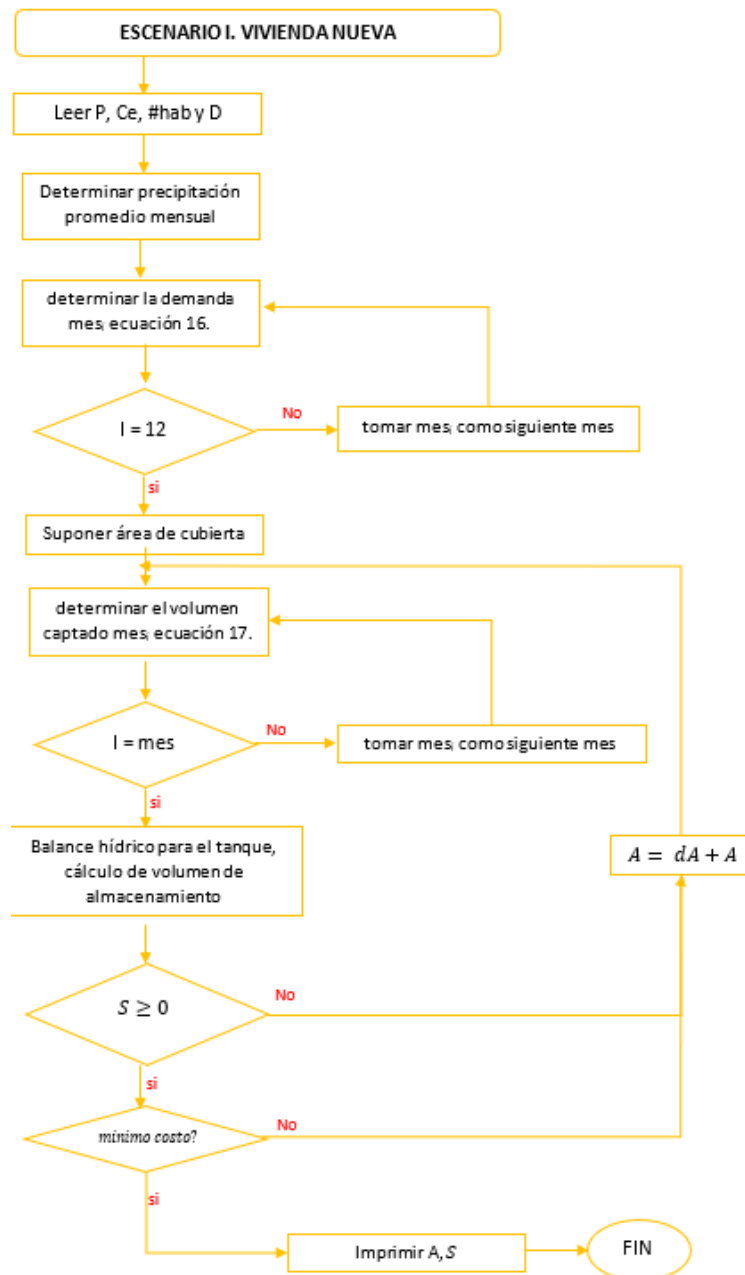


Ilustración 35. Diagrama de flujo para el diseño del sistema de cosecha de aguas lluvias en una vivienda nueva - Elaboración propia.



Para el análisis del balance hídrico en el tanque, en el marco del diseño del sistema de cosecha de aguas lluvias para el Escenario 1, se sugiere que, de ser posible, el cálculo sea realizado a escala diaria en lugar de mensual. Este enfoque permite un mayor nivel de detalle al considerar variaciones diarias en las precipitaciones, demanda de agua, y almacenamiento.

El análisis diario proporciona una representación más precisa del comportamiento del sistema, identificando periodos críticos con déficit o excedente de agua que podrían pasar desapercibidos en un análisis mensual. Adicionalmente, este nivel de precisión contribuye a un dimensionamiento más ajustado del volumen de almacenamiento y permite optimizar los costos del sistema.

Por lo tanto, si se dispone de herramientas computacionales, se recomienda implementar esta metodología diaria en el balance hídrico, utilizando software o lenguajes de programación que permitan manejar grandes volúmenes de datos y realizar iteraciones de manera eficiente. Esto resultará en un diseño más robusto y adaptado a las condiciones reales de la vivienda y su entorno climático.

9.3.2. Escenario 2: Adaptación de Sistema de Cosecha de Aguas Lluvias para Vivienda Rural Existente

En el Escenario 2 se analiza el diseño de un sistema de cosecha de aguas lluvias para una vivienda existente. En este caso, se parte de la premisa de que las características de la vivienda, como el área de la cubierta, ya están definidas. El objetivo principal es determinar el volumen de almacenamiento necesario para cubrir la demanda de agua de los habitantes mediante un balance hídrico mensual del tanque.

El proceso inicia con la recopilación de los parámetros necesarios, incluyendo la precipitación promedio mensual (P), el coeficiente de escurrimiento (C_e), el número de habitantes ($\#hab$) y el área efectiva de la cubierta (A). A partir de esta información, se calcula la demanda mensual de agua basándose en el número de habitantes y su dotación diaria, de acuerdo con la normatividad establecida.

Posteriormente, se determina el volumen mensual de agua captada usando la ecuación de captación de aguas lluvias, que considera el área de la cubierta y la precipitación disponible. Con esta información, se realiza un balance hídrico mensual del tanque para evaluar los volúmenes de entrada y salida. Este análisis permite identificar el almacenamiento necesario para cubrir los periodos de déficit de agua.

Nota: En casos donde el agua captada resulta insuficiente para satisfacer la demanda o el volumen del tanque necesario supera los 5 m^3 ⁴, se recomienda evaluar la instalación de áreas adicionales impermeables, como cubiertas anexas. Estas estructuras, propias de

⁴ Valor recomendado y sugerido por tamaño comercial de tanques de almacenamiento en Colombia



viviendas rurales dispersas, permiten incrementar la captación de agua y garantizar el suministro requerido.

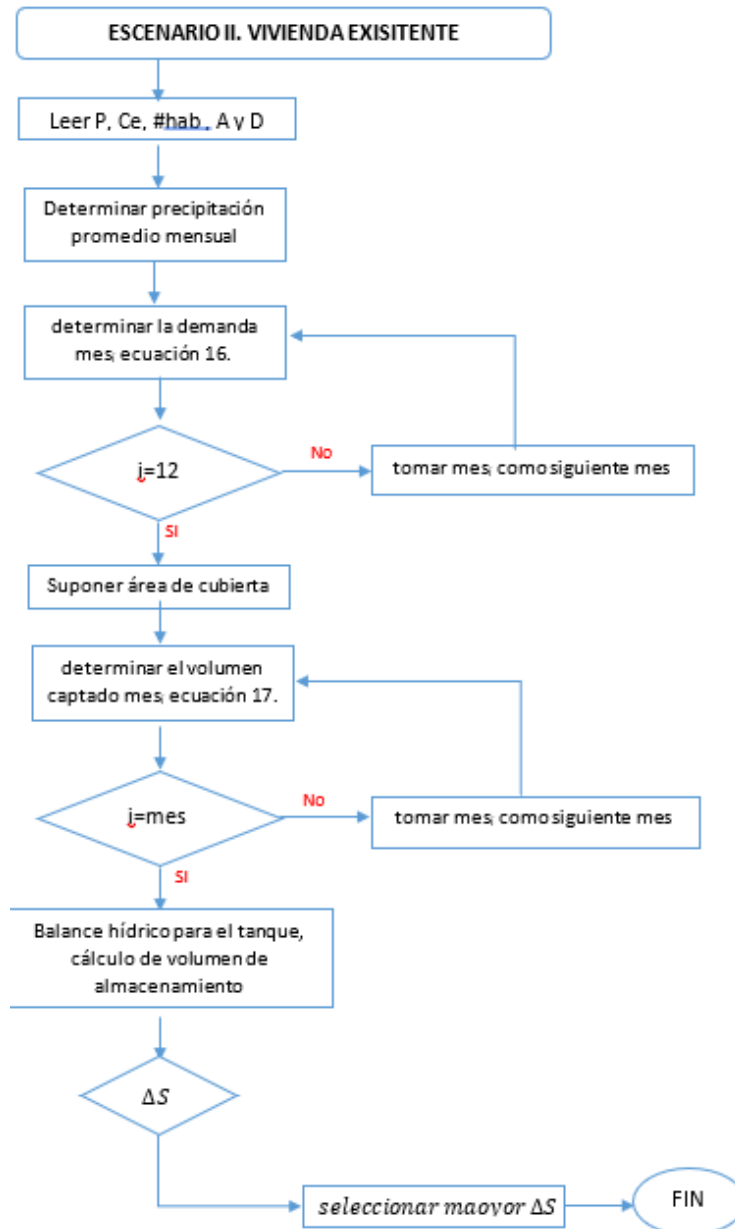


Ilustración 36. Diagrama de flujo para el diseño del sistema de cosecha de aguas lluvias en una vivienda existente-
 Elaboración propia.

Recomendación: Si se cuenta con herramientas computacionales que lo permitan, se recomienda realizar el análisis del balance hídrico de forma diaria, tal como se sugiere en el Escenario 1. Este enfoque incrementa la precisión del cálculo del volumen de almacenamiento necesario, al considerar las variaciones de precipitación y consumo de agua en periodos más cortos, lo cual puede ser particularmente relevante en zonas con alta variabilidad climática.



9.4. Resultado Caso de estudio en Istmina – Chocó

En este apartado se presentan los resultados obtenidos del diseño de un sistema de abastecimiento para dos escenarios, aplicados a vivienda nueva y vivienda existente en el municipio de Istmina, ubicado en el departamento del Chocó, Colombia. Istmina hace parte de la cuenca del río San Juan, uno de los principales cuerpos de agua de la región, y se distingue por tener una de las mayores tasas de pluviosidad a nivel mundial. Estas características convierten a la zona rural de Istmina en un lugar propicio para implementar soluciones de abastecimiento de agua mediante sistemas de cosecha de aguas lluvias.

Para el presente caso de estudio, se definieron los siguientes datos de entrada:

- Población: Según el Censo del DANE 2018, el promedio de habitantes por hogar rural es de 3.8 personas. Sin embargo, la vivienda utilizada como parámetro tiene una capacidad máxima de 5 personas, por lo que este valor se adoptará para el análisis.
- Coeficiente de escorrentía: Dado que la cubierta está construida en material de zinc o similar, se adopta un coeficiente de escorrentía (C) de 0.9, representativo de este tipo de material.
- Dotación: De acuerdo con la Resolución 844 de 2018 del Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio (MVCT), el rango permitido para dotación en zonas rurales varía entre 20 y 200 litros/habitante*día. Considerando que el uso de la vivienda es exclusivamente residencial, se adoptará un valor intermedio de 80 litros/habitante*día.
- Área de la cubierta: La vivienda cuenta con una cubierta de 63.59 m². No obstante, para el análisis en el escenario 1, se considerará un área mínima de captación estimada en 45 m².

9.4.1. Precipitación Istmina

En Istmina, los veranos son cortos y cálidos; los inviernos son cortos y calurosos y está opresivo, mojado y nublado durante todo el año. Durante el transcurso del año, la temperatura generalmente varía de 24 °C a 31 °C y rara vez baja a menos de 22 °C o sube a más de 33 °C.

El análisis de la precipitación en el municipio de Istmina, basado en registros diarios recopilados desde el 1 de enero de 2004 hasta el 11 de noviembre de 2024, revela características hidrometeorológicas destacables que hacen de la región un área ideal para la implementación de sistemas de cosecha de aguas lluvias. Los resultados detallados del análisis de los datos pluviométricos para el municipio de Istmina se sintetizan en la Tabla 24, que presenta un resumen de los principales parámetros estadísticos evaluados. Esta tabla incluye valores como el promedio anual de precipitación, el rango de variabilidad



entre años lluviosos y secos, el promedio mensual de precipitaciones, así como eventos extremos registrados durante el periodo de estudio.

Tabla 24. Resumen de los parámetros pluviométricos para el municipio de Istmina (2004-2024) - elaboración propia

Indicador	Valor
Año con mayor precipitación total	2022 con 13251 mm
Mes con mayor precipitación promedio	Agosto con 879.95 mm promedio mensual (análisis de 21 años)
Mes con menor precipitación promedio	Febrero con 575.38 mm promedio mensual (análisis de 21 años)
Año con más días de lluvia	2005 con 294 días lluviosos
Año con menos días de lluvia	2020 con 227 días lluviosos
Día con mayor precipitación registrada	21 de diciembre de 2018 con 422 mm
Meses con mayor cantidad de lluvia	Agosto, septiembre y octubre
Meses con menor cantidad de lluvia	Enero, febrero y diciembre

En la Tabla 25 se presentarán los datos de precipitación promedio mensual multianual y el número de días lluviosos luego de procesar datos de precipitaciones diarias desde el día 01 de enero de 2004 al 11 de noviembre de 2024.

Tabla 25. Precipitación promedio mensual y días de lluvia - Quibdó

MES	Precipitación promedio mensual (mm)	Número de días lluviosos promedio mensual (día)
ENERO	628.5	20
FEBRERO	575.4	19
MARZO	816.4	21
ABRIL	786.3	20
MAYO	784.8	22
JUNIO	735.4	21
JULIO	799.2	23
AGOSTO	879.9	22
SEPTIEMBRE	790.5	22
OCTUBRE	758.2	21
NOVIEMBRE	619.4	21
DICIEMBRE	644.1	20

El promedio anual de precipitación durante el periodo de estudio es de 8767 mm, evidenciando un régimen pluviométrico significativamente elevado en comparación con los promedios nacionales y globales. El año con mayor precipitación total fue 2022, con un registro anual de 13251 mm, mientras que el año con menor precipitación fue 2015, con 6400 mm, valor que, aunque inferior dentro del contexto local, sigue superando ampliamente los valores promedio de muchas otras regiones del mundo como se puede observar en el Gráfico 1. Precipitación Anual en el Municipio de Istmina (2004-2024)

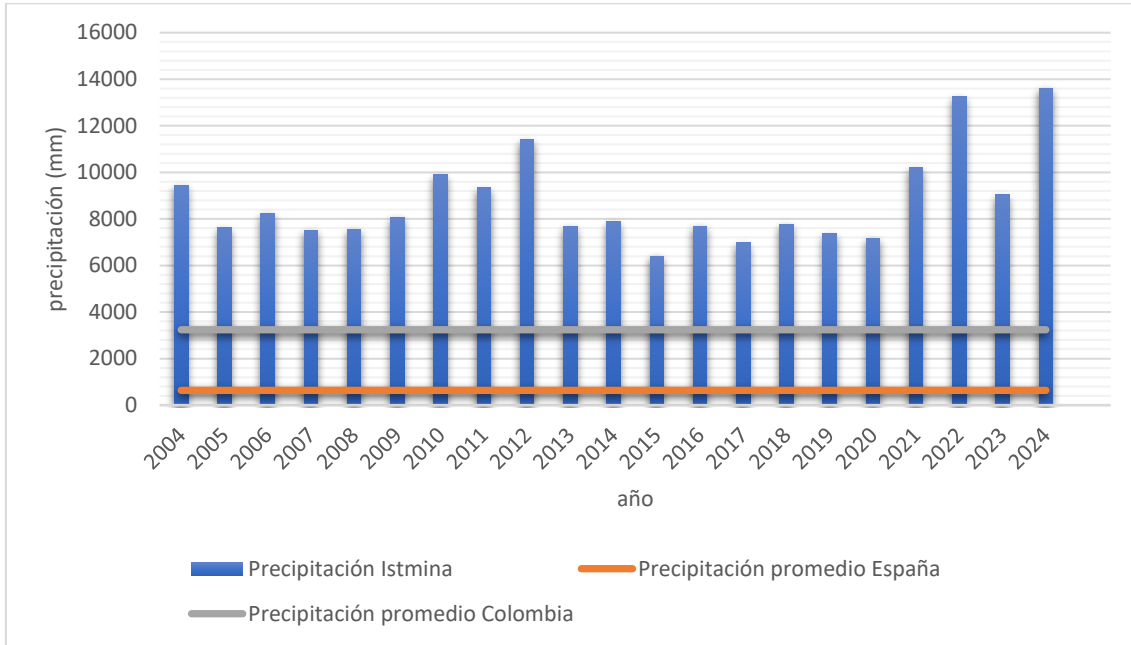


Gráfico 1. Precipitación Anual en el Municipio de Istmina (2004-2024) – comparación.

Como se evidencia en el Gráfico 2, en términos de temporalidad, el municipio experimenta en promedio 252 días lluviosos por año, lo que representa aproximadamente el 69% de los días del año. El año con mayor número de días lluviosos fue 2005, mientras que 2020 presentó la menor cantidad de días con lluvia, con un registro de 227 días. Este análisis resalta la regularidad de las precipitaciones en Istmina y su consistencia en proporcionar agua a lo largo del año.

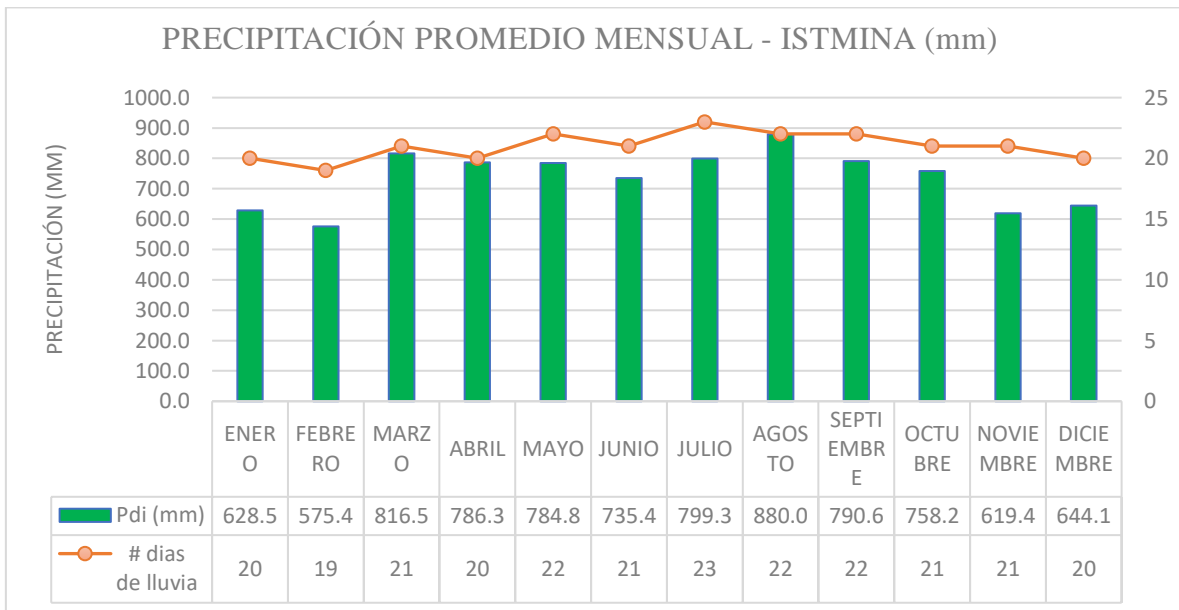


Gráfico 2. Precipitación promedio mensual y días de lluvia - Istmina



Adicionalmente, el análisis mensual muestra que el mes con mayor precipitación promedio es mayo, con 879.95 mm, mientras que el mes más seco es febrero, con un promedio de 575.38 mm. Un evento extremo notable ocurrió el 21 de diciembre de 2018, día en el que se registró una precipitación excepcional de 422 mm, destacándose como el día con mayor acumulación de lluvia en los 21 años analizados.

Estos resultados evidencian no solo la abundancia hídrica del municipio de Istmina, sino también una distribución espacial y temporal de la precipitación favorable para el diseño e implementación de sistemas de abastecimiento basados en la captación y aprovechamiento de aguas lluvias

9.4.2. Escenario 1: Diseño de Sistema de Cosecha de Aguas Lluvias para Vivienda Rural Nueva – caso de estudio Istmina - Chocó

El diseño del sistema de cosecha de aguas lluvias para una vivienda rural nueva en el municipio de Istmina, Chocó, se realizó considerando cinco escenarios climáticos distintos. Estos escenarios se basan en los datos de precipitación recopilados entre 2004 y 2024, y sirven para evaluar cómo varían los resultados del sistema de cosecha bajo condiciones meteorológicas diversas. Como se discutió en capítulos anteriores de esta investigación, la optimización del sistema de cosecha de aguas lluvias se centra en la minimización del volumen de almacenamiento, dado que un mayor volumen de almacenamiento no solo incrementa los costos de infraestructura, sino que también puede afectar negativamente la calidad del agua almacenada debido a la prolongada permanencia del agua en los tanques. A continuación, se detallan los cinco escenarios evaluados:

- **Escenario con datos de precipitación promedio diaria (idealizado):** En este escenario se utiliza el valor promedio de precipitación diaria calculado a partir del periodo de estudio, que tiene un promedio anual de 8,767 mm, con 252 días lluviosos en promedio cada año. Este valor de precipitación se asume constante a lo largo de los días del año, lo que se interpreta como una situación idealizada en la que siempre se cuenta con lluvia, aunque sea en baja cantidad. Este escenario permite evaluar un diseño optimista para el sistema, sin tener en cuenta las variaciones diarias o mensuales. Aunque este modelo no refleja la variabilidad real del clima, es útil para prever la capacidad de captura bajo condiciones teóricas, asumiendo una disponibilidad constante de agua.

En este escenario, se parte del supuesto idealizado de que la precipitación se distribuye uniformemente a lo largo de los 365 días del año (todos los días del año llueve). Este enfoque permite calcular el área mínima de cubierta requerida para garantizar el abastecimiento de agua y optimizar el sistema de cosecha de aguas lluvias, obteniendo los siguientes resultados



Tabla 26. Resultados Escenario 1. Istmina - Precipitación promedio.

Datos de entrada		
Población	5	Hab
Coefficiente de escorrentía (C)	0.9	Cubierta en zinc
Dotación (Res 844 de 2018)	80	l/hab*día
demanda diaria (80%)	0.32	m ³ /día
demanda diaria ducha (20%)	0.08	m ³ /día
Resultados		
ÁREA	45	m ²
Almacenamiento superior	0.25	m ³
Almacenamiento	1	m ³
Observación		
El menor nivel de almacenamiento en el tanque es 0.87 m³, el día con mayor captación es 2.19m³, el área mínima es 45 m² y el volumen de almacenamiento mínimo es 1.25 m³.		
CUMPLE		
Numero de días de déficit	0	

Área de captación requerida:

El área de captación definida es de 45 m². Este valor no se determina por condiciones hidrológicas o hidráulicas específicas, sino porque fue establecido previamente como el área mínima en el diseño, considerando que Es lo suficientemente pequeña para adaptarse a una vivienda rural típica y Representa una solución práctica para una vivienda con 5 habitantes, donde generalmente se dispone de espacio suficiente para una cubierta de estas dimensiones.

Capacidad de almacenamiento:

El sistema necesita un volumen total de almacenamiento de 1.25 m³, distribuido en dos tanques comerciales, la configuración de los tanques se representa en Ilustración 30. Corte Transversal vivienda modificada - fuente propia 2024 (REVIT):

- ✓ Un tanque inferior de 1,000 litros.
- ✓ Un tanque superior de 250 litros.

Estos volúmenes corresponden a medidas estándar disponibles en el mercado colombiano, garantizando una implementación práctica. Sin embargo, si se opta por un tanque fabricado in situ, los volúmenes podrían ajustarse para reflejar los valores exactos requeridos.



Comportamiento del tanque durante el año:

A lo largo del año, el tanque mantiene un nivel suficiente para satisfacer la demanda de agua de los habitantes, sin presentar días de déficit. Esto significa que el nivel del tanque nunca desciende a 0 m³, lo que asegura un suministro continuo de agua durante todo el periodo analizado. El menor nivel registrado es de 0.87 m³, lo que garantiza un almacenamiento adecuado incluso en los momentos de mayor consumo. Este comportamiento se ilustra en el Gráfico 3 que muestra los niveles del tanque durante todo el año.

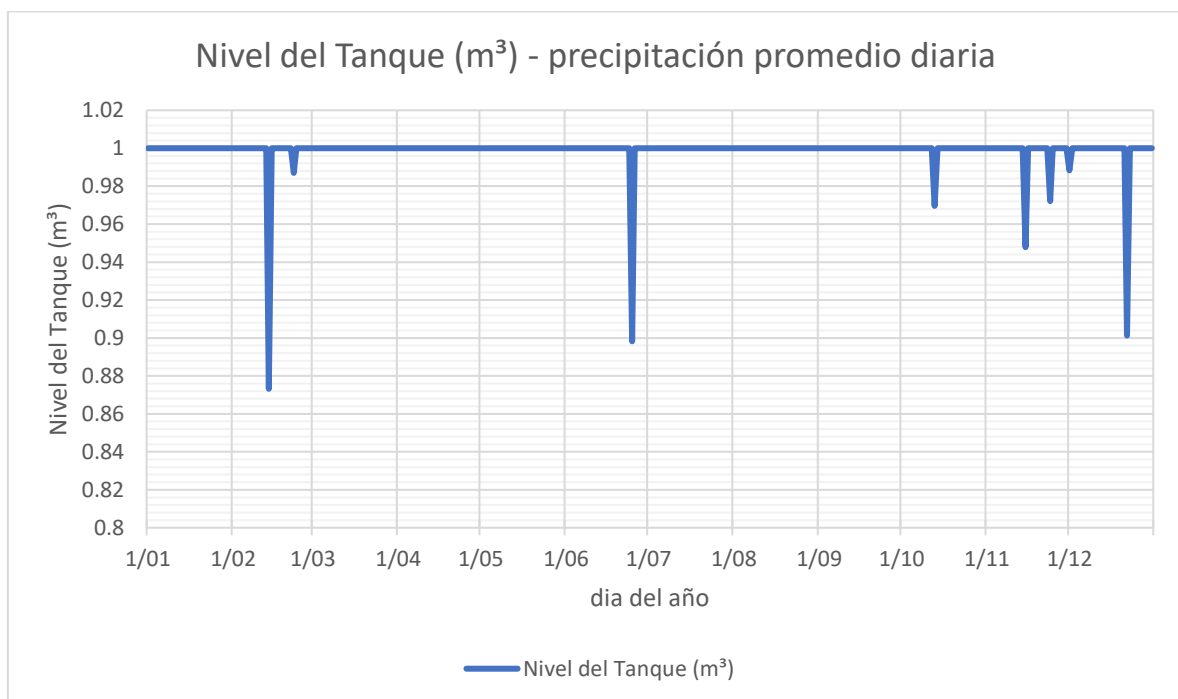


Gráfico 3. Nivel del Tanque (m³) - precipitación promedio diaria.

- Escenario con datos de precipitación del año más lluvioso (2022):** Este escenario se basa en los datos del año más lluvioso registrado en Istmina, 2022, con una precipitación total de 13,251 mm, significativamente superior al promedio anual del municipio. Este escenario muestra un exceso de lluvia durante el año, lo que genera una mayor oferta de agua para el sistema de cosecha. Sin embargo, el reto radica en la distribución temporal de las precipitaciones, ya que las lluvias concentradas en pocos días podrían sobrecargar el sistema de almacenamiento. Este escenario es útil para evaluar la capacidad del sistema de captación para manejar grandes volúmenes en períodos cortos, y cómo optimizar el almacenamiento.



Este escenario evalúa el desempeño de un sistema de cosecha de aguas lluvias durante el año más lluvioso registrado (2022), un año bisiesto con precipitaciones significativamente altas que impactan directamente el diseño y la operación del sistema.

Tabla 27. Resultados escenario 1. Istmina - precipitación del año más lluvioso (2022)

Datos de entrada		
Población	5	Hab
Coefficiente de escorrentía (C)	0.9	Cubierta en zinc
Dotación (Res 844 de 2018)	80	l/hab*día
demanda diaria (80%)	0.32	m ³ /día
demanda diaria ducha (20%)	0.08	m ³ /día
Resultados		
ÁREA (asumida)	50	m ²
Almacenamiento superior (asumido)	0.25	m ³
Almacenamiento (asumido)	2	m ³
Observación		
El menor nivel de almacenamiento en el tanque es 0.04 m³, el día con mayor captación es 14.49m³, el área mínima es 50 m² y el volumen de almacenamiento mínimo es 2.25 m³.		
CUMPLE		
Numero de días de déficit	0	

Área de captación requerida:

En este caso, el área de captación requerida fue ajustada a 50 m² para satisfacer la demanda de agua durante los periodos de mayor consumo y garantizar los volúmenes necesarios. Este aumento en el área responde directamente a la necesidad de maximizar la captación de agua en un contexto de alta disponibilidad pluviométrica y demanda constante, especialmente para una vivienda habitada por 5 personas.

Capacidad de almacenamiento:

El sistema de almacenamiento se dimensionó con un volumen total de 2.25 m³, distribuido entre:

- ✓ Un tanque principal de 2,000 litros.
- ✓ Un tanque secundario de 250 litros.

Estas capacidades corresponden a los tamaños estándar comercializados en Colombia, un criterio práctico que asegura la viabilidad del sistema. Sin embargo, cabe la posibilidad



de ajustar este diseño utilizando tanques fabricados in situ, lo que permitiría mayor flexibilidad en escenarios específicos.

Comportamiento del tanque durante el año:

El análisis muestra que, a lo largo del año, el sistema mantiene niveles óptimos en el tanque, alcanzando su punto más bajo el 12 de marzo, con un volumen residual de 40 litros luego de un periodo de 7 días sin lluvias significativas. En ningún momento se presenta un déficit, entendido este como la situación en que el nivel del tanque alcanza 0 m³, dejando a la vivienda sin capacidad de suministro.

En la Gráfica 2 se presentan los niveles del tanque a lo largo del año, destacando su capacidad para mantener un almacenamiento adecuado incluso en situaciones críticas.

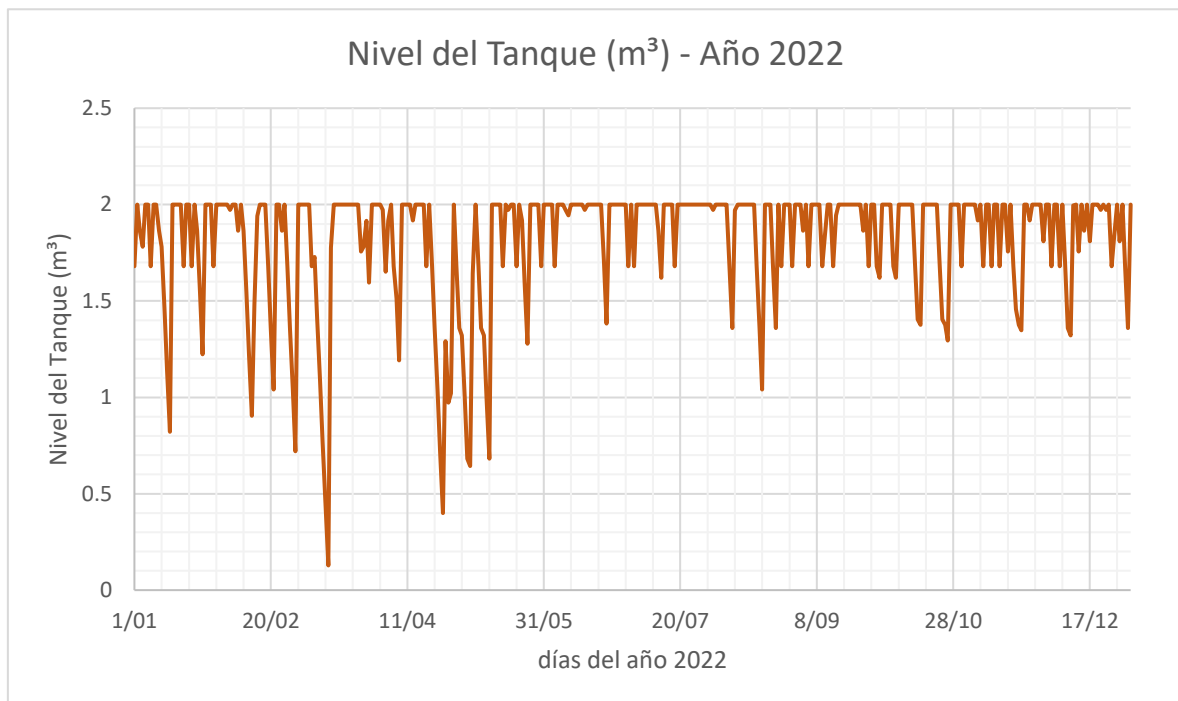


Gráfico 4. Nivel del Tanque (m³) - precipitación año más lluvioso (2022)

- **Escenario con datos de precipitación del año más seco (2015):** En este escenario se evalúa el año más seco registrado, 2015, con una precipitación total de 6,400 mm. Aunque este valor es bajo en comparación con otros años, sigue siendo adecuado para la cosecha de aguas lluvias, pero requiere un aumento en la superficie de captación y el almacenamiento. A pesar de que la cantidad total de precipitación es menor, la optimización del sistema en este escenario se enfoca en maximizar la captación durante los días de lluvia y gestionar el volumen de almacenamiento necesario para suplir las necesidades de agua durante los



períodos secos. Este escenario subraya la importancia de balancear la captación y el almacenamiento para evitar tanto la insuficiencia de agua como el exceso de capacidad de almacenamiento.

En este escenario se evaluó el desempeño del sistema de cosecha de aguas lluvias bajo las condiciones más críticas de disponibilidad hídrica registradas, correspondientes al año más seco (2015).

Tabla 28. Resultados escenario 1. Istmina - precipitación del año más seco (2015)

Datos de entrada		
Población	5	Hab
Coefficiente de escurrentía (C)	0.9	Cubierta en zinc
Dotación (Res 844 de 2018)	80	l/hab* día
demanda diaria (80%)	0.32	m ³ /día
demanda diaria ducha (20%)	0.08	m ³ /día
Resultados		
ÁREA (asumida)	60	m ²
Almacenamiento superior (asumido)	0.25	m ³
Almacenamiento (asumido)	2.5	m ³
Observación		
El menor nivel de almacenamiento en el tanque es 0 m³, el día con mayor captación es 7.94m³, el área mínima es 60 m² y el volumen de almacenamiento mínimo es 2.75 m³.		
ALERTA DEFICIT		
Numero de días de déficit	7	

Área de captación requerida:

En este escenario, se utilizó un área de captación de 60 m², la cual fue seleccionada para maximizar la recolección de agua durante los eventos de lluvia en condiciones de baja precipitación. Este valor responde a la necesidad hidrológica de garantizar la mayor cantidad de agua disponible en un año caracterizado por condiciones extremadamente secas.

Capacidad de almacenamiento:

El volumen total de almacenamiento implementado en este análisis fue de 2.75 m³, distribuido de la siguiente manera:

- ✓ Tanque inferior: capacidad de 2,500 litros, utilizado como almacenamiento principal.



- ✓ Tanque superior: capacidad de 250 litros

Estos volúmenes fueron elegidos basándose en las capacidades estándar de tanques prefabricados disponibles en el mercado colombiano, ajustados para optimizar costos y practicidad.

Comportamiento del tanque durante el año:

Durante la simulación del balance hídrico mensual, se identificó que el sistema presentó déficit de agua en el periodo comprendido entre el 29 de junio y el 5 de julio, debido a un evento de 15 días sin lluvias significativas. Durante este tiempo, el nivel del tanque alcanzó los 0 litros, lo que implica que no había disponibilidad de agua para cubrir la demanda de los habitantes.

El resto del año, el sistema mantuvo un comportamiento adecuado, con niveles que permitieron satisfacer la demanda diaria de la vivienda. Este comportamiento está representado en el Gráfico 5, que muestra la evolución del nivel del tanque a lo largo del año 2015.

Aunque se presenta un periodo de déficit equivalente al 1.9% del tiempo total del año, esta situación no es grave y puede gestionarse mediante estrategias de concientización para el uso eficiente del recurso, especialmente en los meses más secos como junio y julio.

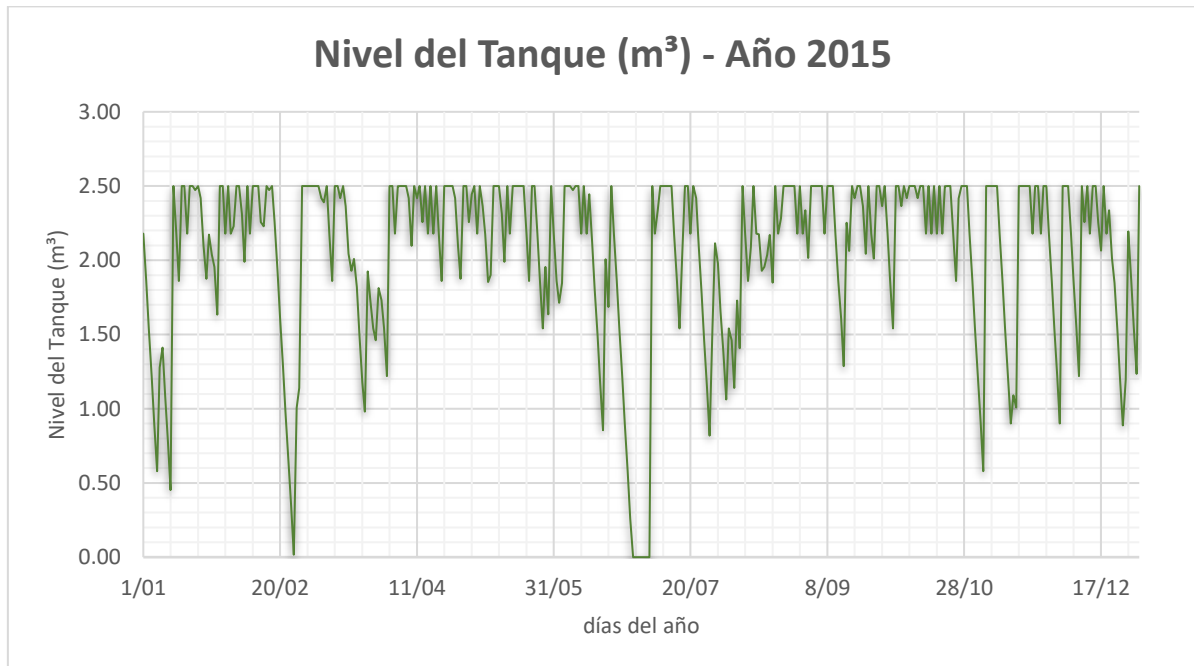


Gráfico 5. Nivel del Tanque (m^3) - precipitación año más seco (2015)



Para eliminar completamente este déficit, sería necesario ampliar el volumen del tanque inferior a 5,000 litros y aumentar el área de captación a 100 m². Sin embargo, estas modificaciones implican un incremento considerable en los costos de implementación y podrían comprometer la calidad del agua debido al mayor tiempo de retención en tanques de gran capacidad, lo que contradice los principios de diseño eficiente y sostenible del sistema.

Este análisis demuestra que, aunque el sistema no es totalmente inmune a los periodos secos extremos, su diseño actual ofrece un balance adecuado entre eficiencia, costos y calidad, haciendo innecesarias modificaciones significativas para manejar un déficit puntual.

- Escenario con datos del año con mayor número de días lluviosos (2005):** Este escenario se basa en el año con mayor número de días lluviosos registrados en Istmina, 2005, con 255 días de lluvia. Aunque la precipitación total no fue la más alta, la distribución más uniforme de las lluvias permite un diseño más eficiente del sistema de cosecha, ya que las lluvias se distribuyen de manera más continua a lo largo del año. Este tipo de escenario es favorable porque permite reducir la necesidad de grandes volúmenes de almacenamiento, minimizando así los costos y los riesgos asociados con la mala calidad del agua almacenada por períodos largos. La optimización en este caso se logra maximizando la eficiencia de la captación sin la necesidad de grandes infraestructuras de almacenamiento.

En este escenario se evaluó el desempeño del sistema de cosecha de aguas lluvias bajo las condiciones más críticas de disponibilidad hídrica registradas, correspondientes al año con mayor número de días lluviosos en el periodo de estudio (2005).

Tabla 29. Resultados escenario 1. Istmina - precipitación del año con más días de lluvia (2005)

Datos de entrada		
Población	5	Hab
Coefficiente de escorrentía (C)	0.9	Cubierta en zinc
Dotación (Res 844 de 2018)	80	l/hab*día
demanda diaria (80%)	0.32	m ³ /día
demanda diaria ducha (20%)	0.08	m ³ /día
Resultados		
ÁREA (asumida)	90	m ²
Almacenamiento superior (asumido)	0.25	m ³
Almacenamiento (asumido)	2.5	m ³
Observación		



El menor nivel de almacenamiento en el tanque es 0.02 m³, el día con mayor captación es 13.58 m³, el área mínima es 90 m² y el volumen de almacenamiento mínimo es 3.25 m³.

CUMPLE

Numero de días de déficit	0
----------------------------------	---

Área de captación requerida:

En este escenario, se determinó un área de 82 m² para la captación de aguas lluvias. Esta área se eligió en función del régimen de lluvias del año 2005, que a pesar de no haber sido el más lluvioso en términos de precipitación total, presentó una distribución temporal más favorable, con un mayor número de días lluviosos a lo largo del año. Para optimizar la recolección de agua durante estos días lluviosos más frecuentes, se consideró necesario aumentar el área de captación, garantizando que el sistema fuera capaz de capturar la mayor cantidad de agua posible en este periodo.

Capacidad de almacenamiento:

El volumen total de almacenamiento utilizado en este análisis es de 3.25 m³, distribuidos de la siguiente forma:

- ✓ Tanque inferior: capacidad de 3,000 litros, destinado a almacenar la mayor parte del agua captada.
- ✓ Tanque superior: capacidad de 250 litros, utilizado para garantizar la presión del sistema.

Este volumen de almacenamiento es adecuado para los niveles de precipitación y la distribución temporal observada en el año 2005, sin presentar problemas de capacidad ni de escasez de agua a lo largo del año.

Comportamiento del tanque durante el año:

Durante la simulación del balance hídrico mensual, el sistema no presentó déficit, manteniendo niveles de almacenamiento adecuados durante todo el año. El menor nivel de almacenamiento en el tanque se alcanzó en 0.02 m³ que se presentó en marzo 18 de 2015.

A continuación, se presenta un gráfico que muestra el comportamiento del nivel del tanque durante el año. Este gráfico refleja la variación del nivel de almacenamiento en función de las precipitaciones diarias y el balance hídrico mensual.

Este análisis muestra que, con un área de captación de 90 m² y un volumen de almacenamiento de 2.75 m³, el sistema es completamente eficiente para el año 2005,



garantizando un suministro adecuado de agua sin ningún déficit. La mayor cantidad de días lluviosos permitió una distribución temporal adecuada del recurso, asegurando que los niveles de almacenamiento se mantuvieran estables durante todo el año.

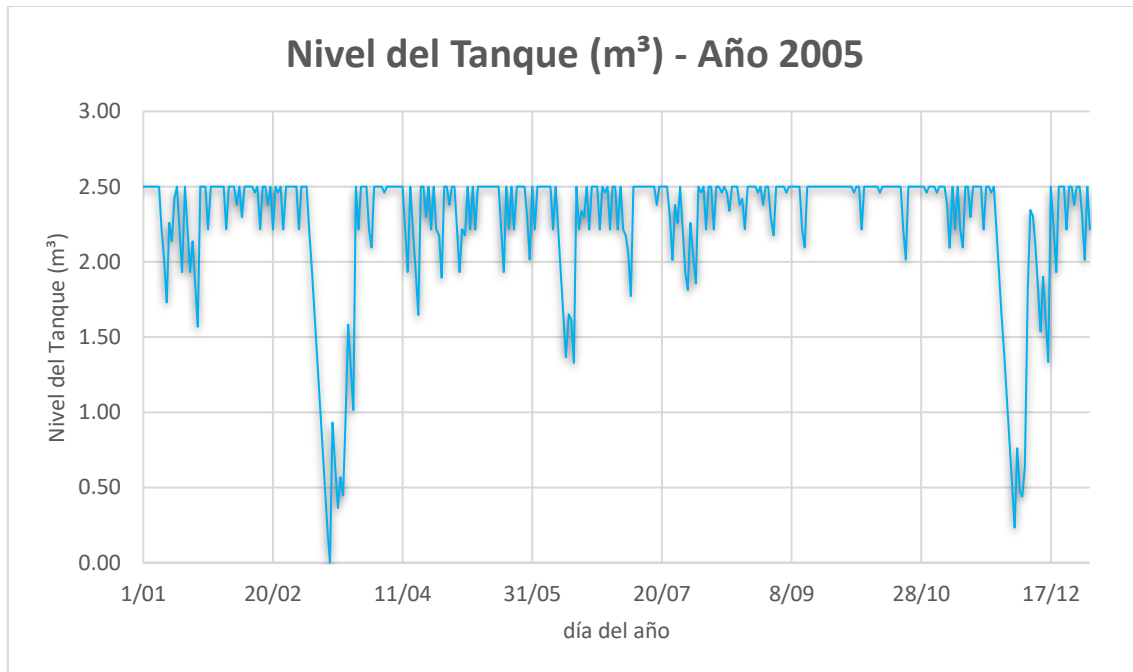


Gráfico 6. Nivel del Tanque (m^3) - precipitación año con más días de lluvia (2005)

Este escenario demuestra que, bajo un régimen de lluvias con una distribución más equilibrada, como el observado en 2005, no es necesario un aumento significativo en el área de captación o el volumen de almacenamiento, ya que el sistema es capaz de gestionar la variabilidad en la precipitación sin comprometer el suministro de agua

- **Escenario con datos del año con menor número de días lluviosos (2020):** Este escenario corresponde al año con la menor cantidad de días lluviosos registrados, 2020, con solo 227 días de lluvia. A pesar de que la precipitación total fue moderada, la distribución irregular de las lluvias obliga a aumentar tanto la superficie de captación como el volumen de almacenamiento para asegurar el suministro de agua durante los días secos. Este escenario es crítico porque requiere un diseño que maximice la eficiencia de la captación y, al mismo tiempo, considere el volumen adecuado de almacenamiento para asegurar la disponibilidad de agua durante los períodos sin lluvia. Sin embargo, como se mencionó en capítulos anteriores, la optimización de este sistema debe tener en cuenta la minimización del volumen de almacenamiento para evitar costos elevados y mejorar la calidad del agua.



En este escenario, se analiza el comportamiento de un sistema de cosecha de aguas lluvias diseñado para una vivienda rural utilizando los datos de precipitación del año 2020, caracterizado por un número reducido de días lluviosos.

Tabla 30. Resultados escenario 1. Istmina - precipitación del año con menos días de lluvia (2020)

Datos de entrada		
Población	5	Hab
Coefficiente de escorrentía (C)	0.9	Cubierta en zinc
Dotación (Res 844 de 2018)	80	l/hab*día
demanda diaria (80%)	0.32	m ³ /día
demanda diaria ducha (20%)	0.08	m ³ /día
Resultados		
ÁREA (asumida)	91	m ²
Almacenamiento superior (asumido)	0.25	m ³
Almacenamiento (asumido)	2.5	m ³
Observación		
El menor nivel de almacenamiento en el tanque es 0 m³, el día con mayor captación es 14.74m³, el área mínima es 91 m² y el volumen de almacenamiento mínimo es 2.75 m³.		
ALERTA DEFICIT		
Numero de días de déficit	5	

Área de captación requerida:

Para este escenario, basado en los datos de precipitación del año 2020, se determinó un área de 90 m² para la captación de aguas lluvias. Este valor responde a la necesidad de aumentar el área de captación debido a la menor cantidad de días lluviosos registrados en este año. A pesar de que la precipitación total no es tan baja como en otros años, la distribución de la lluvia fue más concentrada, lo que requirió una mayor superficie de captación para garantizar un almacenamiento suficiente durante los días más secos.

Capacidad de almacenamiento:

El volumen total de almacenamiento calculado es de 2.75 m³, distribuido entre:

- ✓ Tanque inferior: 2,500 litros, que almacena la mayor parte del agua captada.
- ✓ Tanque superior: 250 litros

Comportamiento del tanque durante el año:

A lo largo del año, el sistema presenta algunos déficits de agua en los días 17 y 18 de noviembre, 3 y 4 de diciembre, y 13 de diciembre, cuando el nivel de los tanques alcanza



0 litros, lo que indica la ausencia de agua almacenada. A pesar de estos déficits, es importante resaltar que la duración total del déficit es solo el 1.4% del tiempo total, lo que significa que el sistema funcionó correctamente en la mayoría de los días como se puede vislumbrar en el grafico 5.

Este pequeño déficit podría mitigarse con una gestión eficiente del recurso, especialmente durante los meses de noviembre y diciembre, donde se debe hacer un mejor uso del agua disponible. La concientización en la población sobre la importancia del ahorro de agua durante estos períodos secos podría evitar que el sistema se quede sin recurso durante esos pocos días críticos.

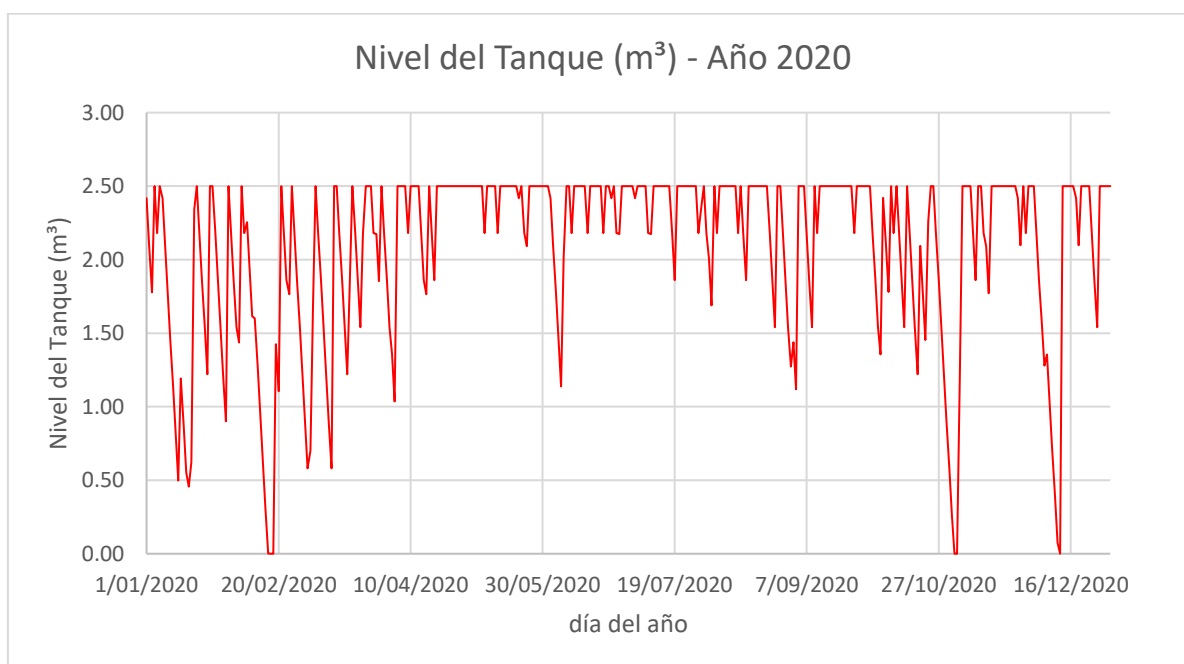


Gráfico 7. Nivel del Tanque (m³) - precipitación año con menos días de lluvia (2020)

Para eliminar el déficit de los cinco días sin agua, sería necesario incrementar el volumen de almacenamiento a 5,000 litros en el tanque inferior y 250 litros en el tanque superior. Sin embargo, como los tamaños comerciales de los tanques en Colombia son discretos, no existen tanques intermedios entre el de 2,500 litros y el de 5,000 litros. Esto significa que, al optar por una capacidad de 5,000 litros, se estaría duplicando el tamaño del tanque inferior, lo que conllevaría a un aumento significativo en los costos de implementación.

Además, este incremento en el almacenamiento permitiría reducir el área de captación de 90 m² a 70 m², lo que representaría una reducción en los costos de construcción de la cubierta. Sin embargo, al usar un tanque de mayor capacidad, el tiempo de retención del agua también aumentaría considerablemente, lo que podría afectar la calidad del agua, además el costo de almacenamiento es mayor que el costo de construcción de la cubierta.



Escenario 2: Adaptación de Sistema de Cosecha de Aguas Lluvias para Vivienda Rural Existente – caso de estudio Istmina – Chocó

En el Escenario 2, se realiza el análisis del diseño de un sistema de cosecha de aguas lluvias para una vivienda rural ya existente en el municipio de Istmina, Chocó. A diferencia del escenario para viviendas nuevas, donde el sistema se ajusta de acuerdo con las condiciones ideales de captación y almacenamiento, este escenario se basa en viviendas cuya infraestructura ya está construida, lo que implica que el área de captación y las capacidades de almacenamiento preexistentes son limitadas. El objetivo principal de este análisis es determinar el volumen de almacenamiento necesario para cubrir la demanda de agua de los habitantes, mediante un balance hídrico mensual del tanque. Como se define en el diagrama de proceso de la Ilustración 36. Diagrama de flujo para el diseño del sistema de cosecha de aguas lluvias en una vivienda existente- Elaboración propia.

Este análisis, realizado para dos años específicos, se enfoca en los escenarios más críticos en términos de precipitación y días lluviosos, con el fin de evaluar cómo se comporta el sistema de cosecha de aguas lluvias en condiciones desfavorables:

- **Escenario con datos de precipitación del año más seco (2015):**

Este escenario se considera uno de los más críticos, ya que 2015 fue el año con la menor precipitación registrada en el periodo de estudio (6,400 mm). En este caso, la cantidad de lluvia disponible fue significativamente baja, lo que implica que el volumen de agua captada es limitado, y el sistema de cosecha debe ser capaz de adaptarse para garantizar el abastecimiento en los días sin lluvia. En este escenario, es probable que el volumen de almacenamiento necesario sea alto, lo cual puede implicar un costo elevado y potenciales problemas de calidad del agua debido a la permanencia prolongada en el tanque.

Los resultados para este caso en particular se fundamentan en encontrar un valor de almacenamiento óptimo para garantizar que no haya déficit con un área conocida de 63.59 m². Se presentarán los resultados para el año 2015 que es uno de los años críticos del estudio, toda vez que, es el año más seco desde 2004 a la fecha.

Tabla 31. Resultados escenario 2. Istmina - precipitación del año más seco (2015)

Datos de entrada		
Población	5	Hab
Coefficiente de escorrentía (C)	0.9	Cubierta en zinc
Dotación (Res 844 de 2018)	80	l/hab*día
demanda diaria (80%)	0.32	m ³ /día
demanda diaria ducha (20%)	0.08	m ³ /día
Área de Vivienda de control	63.59	m ²
Resultados		



Almacenamiento superior (asumido)	0.25	m ³
Almacenamiento (asumido)	5	m ³
Observación		
El menor nivel de almacenamiento en el tanque es 0.52 m³, el día con mayor captación es 8.41m³, el área mínima es 63.59 m² y el volumen de almacenamiento mínimo es 5.25 m³.		
CUMPLE		
Numero de días de déficit	0	

En el escenario del año más seco (2015), se obtuvo que el área de captación necesaria es de 63.59 m², un valor fijo para la vivienda de interés social rural, como se describió en capítulos anteriores. El volumen de almacenamiento calculado es de 5.25 m³, distribuido en un tanque inferior de 5000 litros y un tanque superior de 250 litros. Aunque este volumen es suficiente para cubrir la demanda de agua durante todo el año, el nivel mínimo registrado en el tanque fue de 0.52 m³.

El nivel del tanque con un volumen de 5 m³ se puede observar en el Gráfico 8, donde se muestra que, aunque el sistema cubre todas las necesidades de agua sin déficit durante el año. Sin embargo, existe un riesgo de contaminación debido al largo tiempo de retención del agua en el tanque, especialmente en los meses de menor precipitación. Este sistema es una opción viable para asegurar el suministro continuo de agua, pero tiene el inconveniente de ser más costoso y de mayor complejidad en su implementación, además de presentar un riesgo de calidad del agua por la larga permanencia en almacenamiento.

Por otro lado, la solución con 2.5 m³ de almacenamiento presenta un déficit de 7 días en el año, lo que implica que durante esos días el sistema no tendría agua disponible. Este déficit es manejable, ya que solo representa el 1.9% del tiempo total, lo que se puede mitigar con estrategias de concientización sobre el uso eficiente del agua y el uso de métodos comunales, como pilas públicas. El comportamiento del tanque con este volumen de almacenamiento está reflejado en el Gráfico 9, donde se observa el patrón de llenado y vaciado del tanque a lo largo del año, destacándose los días en los que el tanque alcanza niveles mínimos. Aunque la opción de 2.5 m³ implica un pequeño déficit, es una solución más económica y eficiente, ya que reduce el costo de implementación sin comprometer significativamente el acceso al agua.

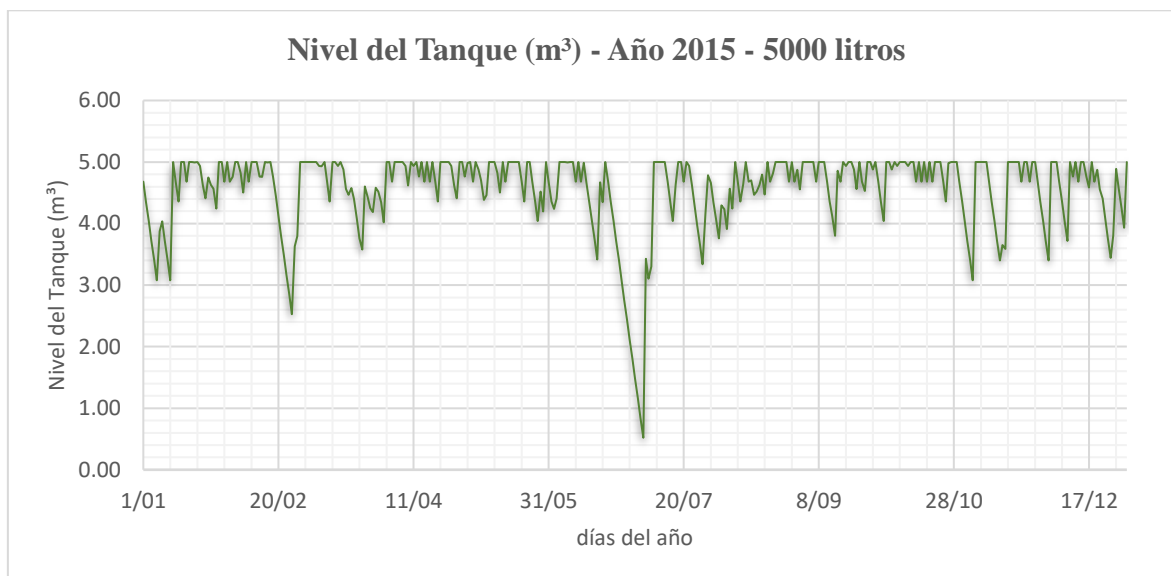


Gráfico 8. Nivel del Tanque de 5m³ - precipitación año más seco (2015)

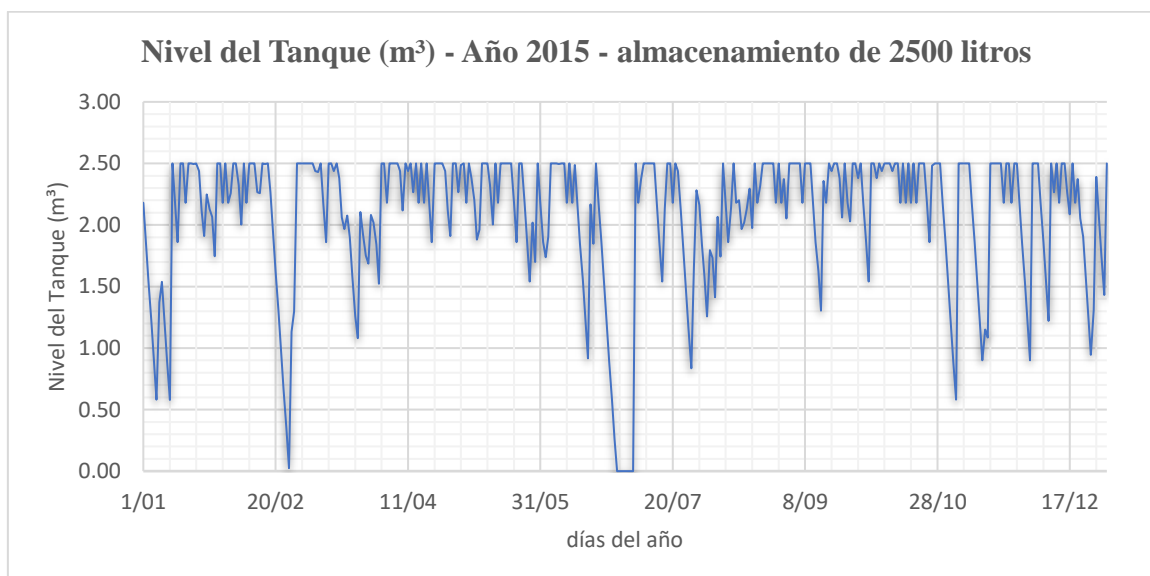


Gráfico 9. Nivel del Tanque de 2.5m³ - precipitación año más seco (2015)

En conclusión, el sistema con **5 m³** de almacenamiento garantiza un suministro continuo de agua, pero presenta riesgos asociados a la calidad del agua debido a largos tiempos de retención y mayores costos de implementación. En cambio, la opción de **2.5 m³** presenta un pequeño déficit de **7 días**, que puede ser mitigado con estrategias de uso eficiente y métodos comunales, representando una solución más económica y eficiente, sin comprometer significativamente el acceso al agua.

- **Escenario con datos del año con menor número de días lluviosos (2020):**



El año 2020 presentó la menor cantidad de días lluviosos (227 días), lo que representa otro escenario crítico para la adaptación del sistema. Aunque la precipitación total no fue tan baja como en 2015, la menor cantidad de días lluviosos significa que la captación de agua ocurre en un período reducido, lo que incrementa la necesidad de almacenar grandes volúmenes de agua durante los días lluviosos para asegurar el suministro en los días secos. Este escenario destaca la importancia de optimizar tanto el área de captación como el volumen de almacenamiento, para evitar costos excesivos y garantizar la disponibilidad de agua durante los periodos de sequía.

Tabla 32. Resultados escenario 2. Istmina - precipitación del año con menos días de lluvia (2020)

Datos de entrada		
Población	5	Hab
Coefficiente de escurrentía (C)	0.9	Cubierta en zinc
Dotación (Res 844 de 2018)	80	l/hab*día
demanda diaria (80%)	0.32	m ³ /día
demanda diaria ducha (20%)	0.08	m ³ /día
ÁREA (asumida)	63.59	m ²
Resultados		
Almacenamiento superior (asumido)	0.25	m ³
Almacenamiento (asumido)	5	m ³
Observación		
El menor nivel de almacenamiento en el tanque es 0.89 m³, el día con mayor captación es 10.3m³, el área mínima es 63.59 m² y el volumen de almacenamiento mínimo es 5.25 m³.		
CUMPLE		
Numero de días de déficit	0	

En el Escenario 2 (año 2020), se obtuvo que el menor nivel de almacenamiento en el tanque es de 0.89 m³, con un día de captación máxima de 10.3 m³. El área mínima de captación requerida es de 63.59 m², lo cual responde al diseño establecido para una vivienda de interés social rural. El volumen mínimo de almacenamiento necesario es de 5.25 m³. Sin embargo, el almacenamiento de agua en tanques con volúmenes muy bajos puede presentar riesgos de contaminación, ya que el tiempo de retención del agua es más corto, lo que puede afectar la calidad del recurso. Si se optara por un almacenamiento de 2.5 m³, se presentaría un déficit de hasta 15 días a lo largo del año, lo cual no es viable debido a los impactos negativos que tendría la falta de agua en períodos prolongados, especialmente en zonas rurales. Aunque este déficit no se presenta de forma continua, el sistema podría experimentar hasta 5 días consecutivos sin agua, lo que representa un



riesgo significativo para la salud pública, ya que durante estos períodos de ausencia de agua no se tendría acceso al recurso hídrico.

Comparando los resultados de los tanques de 5 m³ y 2.5 m³, en el caso del tanque de 5 m³ no se presenta déficit, lo que garantiza un suministro constante de agua durante todo el año. El comportamiento del tanque con este volumen de almacenamiento muestra una estabilidad en los niveles de agua, lo que asegura que la vivienda tenga suficiente agua sin interrupciones. Este comportamiento queda reflejado en el Gráfico 10.

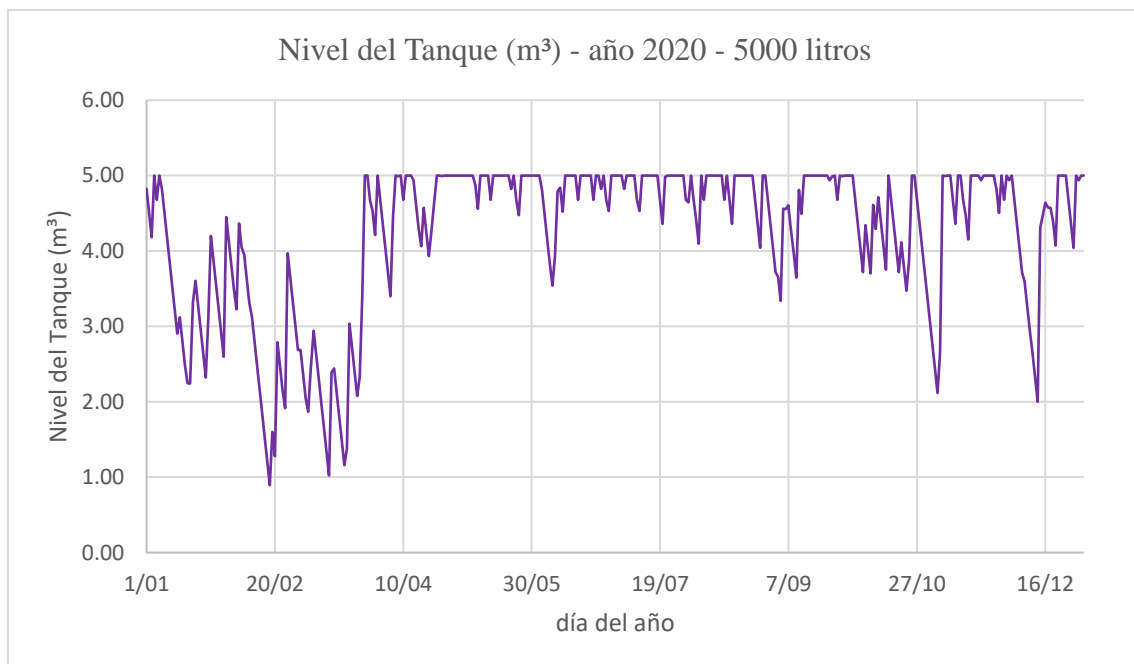


Gráfico 10. Nivel del Tanque de 5m³ - precipitación del año con menos días de lluvia (2020)

Por otro lado, al reducir el almacenamiento a 2.5 m³, el sistema enfrenta un déficit de 15 días, con períodos donde el agua almacenada es insuficiente para satisfacer la demanda. El comportamiento del tanque con este volumen de almacenamiento es mucho más inestable, con oscilaciones notorias en los niveles de agua, y el mayor período de días consecutivos sin agua llega a ser de 5 días, lo cual podría generar problemas de abastecimiento. Este comportamiento es ilustrado en el Gráfico 11, donde se evidencian los períodos de déficit y las fluctuaciones más marcadas en el nivel de agua disponible.

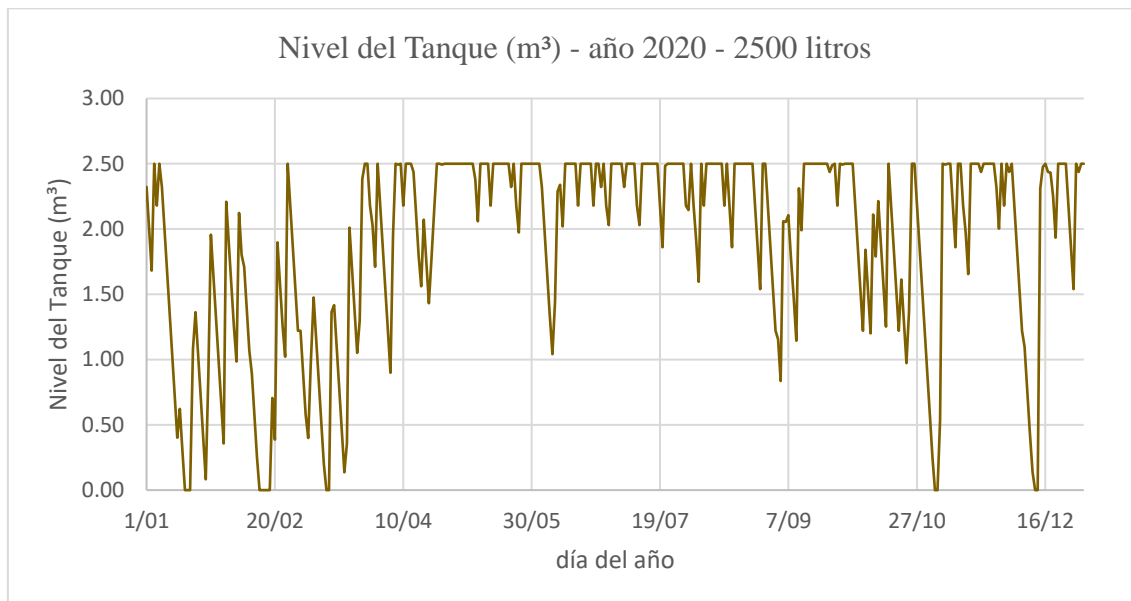


Gráfico 11. Nivel del Tanque de 2.5m³ - precipitación del año con menos días de lluvia (2020)

En conclusión, a pesar de que el almacenamiento de 2.5 m³ puede reducir costos, no es una opción viable debido a la frecuencia y la duración de los déficits, lo que pondría en riesgo la salud pública en zonas rurales. En cambio, el almacenamiento de 5 m³ asegura una disponibilidad constante de agua, aunque con un costo más alto, lo que lo convierte en una solución más adecuada para garantizar la seguridad hídrica y evitar problemas derivados de la falta de agua.

En ambos escenarios, si el agua captada resulta insuficiente para satisfacer la demanda o si el volumen de almacenamiento necesario supera los 5 m³, se recomienda evaluar la posibilidad de ampliar la superficie de captación mediante la instalación de áreas adicionales impermeables, como cubiertas anexas. Estas estructuras, comunes en viviendas rurales dispersas, permiten incrementar la captación de agua y garantizar un suministro adecuado durante todo el año.

9.5. Resultado Caso de estudio en Quibdó – Chocó

En este apartado se presentan los resultados de obtenidos del diseño de un sistema de abastecimiento para dos escenarios, para vivienda nueva y para vivienda existente en el municipio de Quibdó, capital del Departamento del Chocó, está ubicada en una de las regiones más forestales de Colombia, cerca de grandes reservas ecológicas como el Parque Nacional Natural Emberá y una de las regiones con un gran número de reservas indígenas. Se encuentra a orillas del río Atrato, uno de los principales afluentes del país y una de las zonas con más alta pluviosidad del mundo. (Ledezma LLoreda, 2015). Estas condiciones hacen que la zona rural de Quibdó sea un excelente candidato para solucionar una problemática de abastecimiento a partir de la cosecha de aguas lluvias.



9.5.1. Precipitación Quibdó – Chocó

El Pacífico colombiano, está localizado dentro de la región de bajas presiones atmosféricas conocida como «concavidad ecuatorial» en donde convergen los vientos Alisios de cada hemisferio formando la ZCIT (zona de confluencia intertropical). En esta zona, el choque de masas de aire ascendentes con diferencias térmicas y gradientes de humedad, ocasionan la formación de una banda nubosa por procesos de convección. Debido a esto y a las condiciones físicas-geográficas (forma, orientación, rango de altitudes, topografía, vegetación, presencia tierra-agua, no continentalidad, distancia al litoral, etc.) que le son propias, el clima en la región del Pacífico colombiano se caracteriza por sus vientos variables y débiles (zona de calmas ecuatoriales), por su alta pluviosidad, abundante nubosidad y mucha humedad. (Murillo López, Córdoba Machado, & Palomino Lemus, Comportamiento de la precipitación y cuantificación del balance hídrico en la cuenca alta del río Atrato en el departamento del Chocó, 2008)

Tabla 33. Resumen de los parámetros pluviométricos para el municipio de Quibdó (2004-2024) - elaboración propia

Indicador	Valor
Año con mayor precipitación total	2006 con 9628.4 mm
Año con menor precipitación total	2016 con 7290.1 mm
Mes con mayor precipitación promedio	Agosto con 612.09 mm promedio mensual (análisis de 21 años)
Mes con menor precipitación promedio	Febrero con 383.36 mm promedio mensual (análisis de 21 años)
Año con más días de lluvia	2008 con 336 días lluviosos
Año con menos días de lluvia	2023 con 299 días lluviosos
Día con mayor precipitación registrada	25 de diciembre de 2008 con 216.1 mm
Día con menor precipitación registrada	0 mm
Meses con mayor cantidad de lluvia	Agosto, septiembre y octubre
Meses con menor cantidad de lluvia	Enero, febrero y diciembre

El clima de Quibdó se caracteriza por ser cálido – pluvial. El promedio de lluvia total anual es de 8372.3 mm. Lluvia durante todo el año en promedio llueven 323 días del año y por tanto no presenta una temporada seca definida. Sin embargo, durante los meses de diciembre, enero y febrero, las lluvias registran un descenso moderado en sus volúmenes sin dejar de ser abundante, en comparación con el resto del año como se puede observar en el Gráfico 13. Precipitación promedio mensual y días de lluvia - Quibdó (2004-2024). En el primer trimestre llueve entre 23 y 26 días por mes. En los meses de mayores lluvias son mayo, junio, julio y agosto, llueve un promedio de 28 días al mes.

El año con mayor precipitación total fue 2006, con un registro anual de 9628.4 mm, mientras que el año con menor precipitación fue 2016, con 7290.1 mm, valor que, aunque inferior dentro del contexto local, sigue superando ampliamente los valores promedio de



muchas otras regiones del mundo como se puede observar en el Gráfico 12. Precipitación anual en el municipio de Quibdó (2004-2020) -comparación.

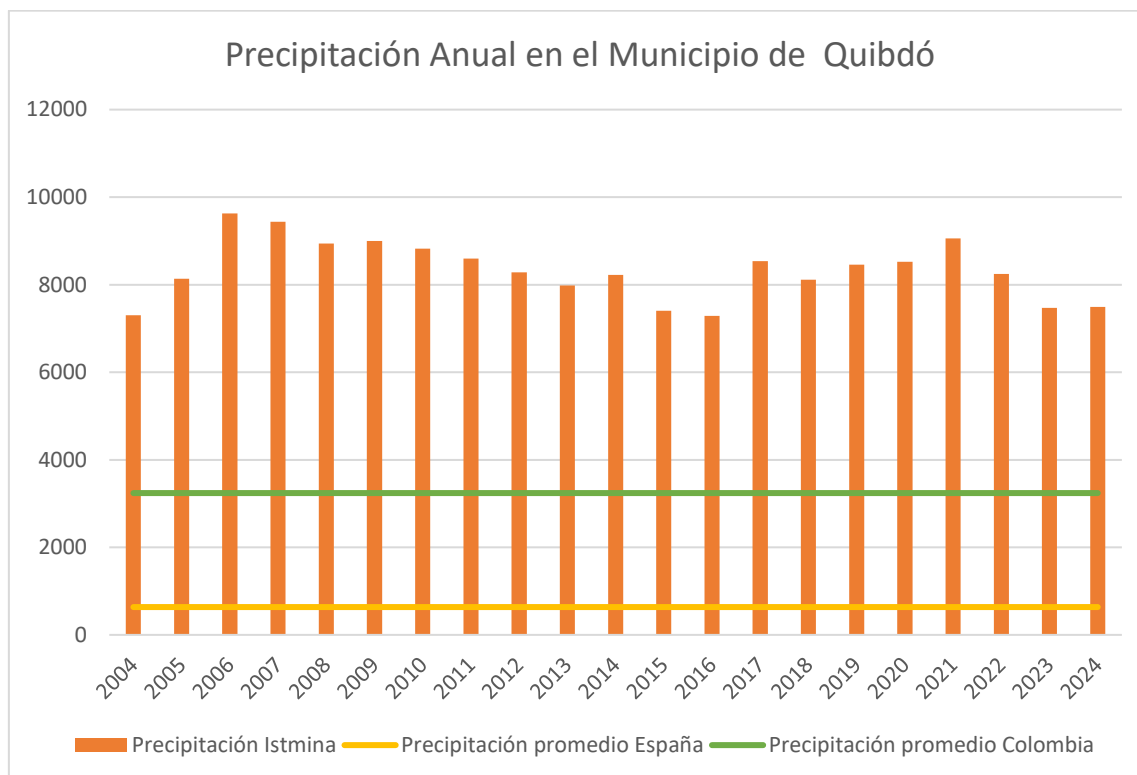


Gráfico 12. Precipitación anual en el municipio de Quibdó (2004-2020) -comparación

En la Tabla 34 se presentará los datos de precipitación promedio mensual multianual y el número de días lluviosos luego de procesar datos de precipitaciones diarias desde el día 01 de enero de 2004 al 11 de noviembre de 2024.

Tabla 34. Precipitación promedio mensual y días de lluvia - Istmina

MES	Precipitación promedio mensual (mm)	Número de días lluviosos promedio mensual (día)
ENERO	604.8	25
FEBRERO	515.7	23
MARZO	599.1	26
ABRIL	652.5	27
MAYO	785.2	28
JUNIO	775.0	27
JULIO	887.2	28
AGOSTO	903.6	28
SEPTIEMBRE	677.8	28
OCTUBRE	613.8	27
NOVIEMBRE	637.1	27



DICIEMBRE	738.1	29
-----------	-------	----

En la Gráfico 13, se representan los datos de precipitación mensual y días lluviosos, en donde se puede observar que el mes con menor cantidad de lluvias fue el mes de febrero con una precipitación media de 515.7 mm y el mes con mayor cantidad de precipitación media mensual fue agosto registrando 903.6mm. Además, se aprecia que febrero tuvo el menor número de días lluviosos, con 23 días, mientras que diciembre destacó con el mayor promedio de días lluviosos, alcanzando un valor de 29 días.

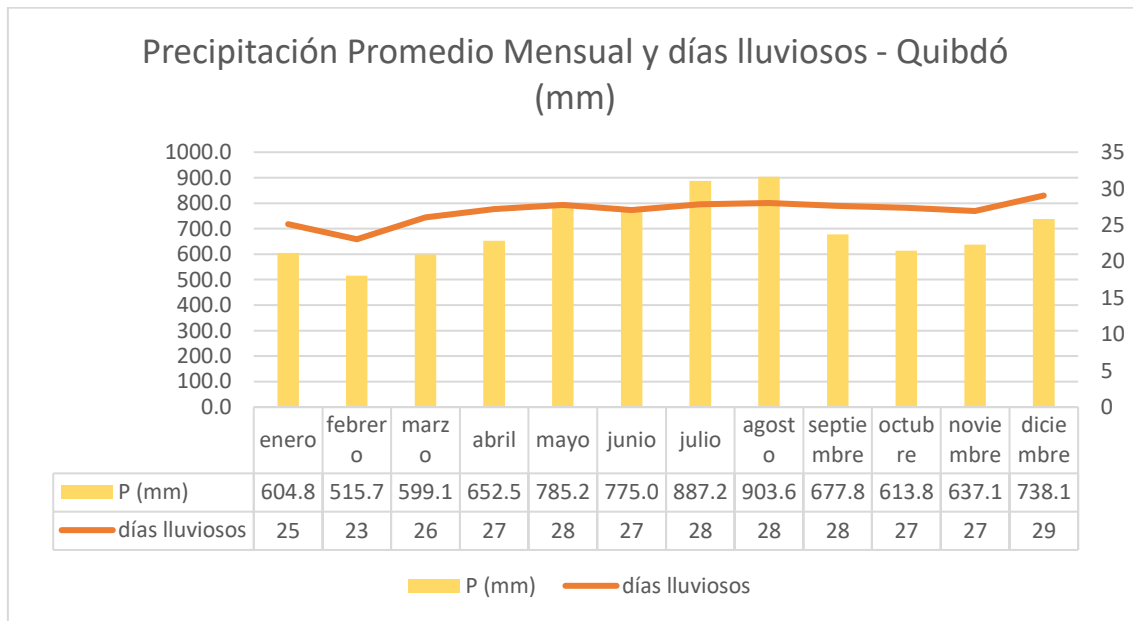


Gráfico 13. Precipitación promedio mensual y días de lluvia - Quibdó (2004-2024)

9.5.2. Escenario 1: Diseño de Sistema de Cosecha de Aguas Lluvias para Vivienda Rural Nueva – caso de estudio Quibdó - Chocó

El diseño del sistema de cosecha de aguas lluvias para una vivienda rural nueva en el municipio de Quibdó, Chocó, se realizó considerando dos escenarios climáticos distintos, basados en los datos de precipitación recopilados entre 2004 y 2024. Estos escenarios permiten evaluar cómo varían los resultados del sistema bajo condiciones meteorológicas diversas y más críticas. Como se discutió en los capítulos anteriores de esta investigación, la optimización del sistema de cosecha de aguas lluvias se centra en la minimización del volumen de almacenamiento, ya que un mayor volumen no solo incrementa los costos de infraestructura, sino que también puede afectar negativamente la calidad del agua almacenada debido a la prolongada permanencia del agua en los tanques.

En este capítulo, se presentan los resultados correspondientes a los dos escenarios evaluados:

- Escenario con datos de precipitación del año más seco (2016)



- Escenario con datos de precipitación del año con menor número de días lluviosos (2023)

Estos dos casos son los que se estudiaron específicamente, ya que, como se expuso en el capítulo anterior, en el caso de estudio de Istmina se determinó que las condiciones más críticas para el diseño del sistema de cosecha de aguas lluvias son precisamente el año más seco y el año con menor cantidad de días lluviosos.

- **Escenario con datos de precipitación del año más seco (2016):** En este escenario se analiza el año con la menor precipitación registrada, 2016, que tuvo un total de 7290.1 mm. Aunque esta cifra es relativamente baja en comparación con otros años, sigue siendo suficiente para la cosecha de aguas lluvias, aunque es necesario incrementar tanto la superficie de captación como el volumen de almacenamiento. A pesar de la baja cantidad total de precipitación, la optimización del sistema en este caso se centra en aprovechar al máximo la captación durante los días lluviosos y gestionar adecuadamente el volumen de almacenamiento necesario para cubrir las necesidades de agua durante los períodos secos. Este escenario destaca la importancia de equilibrar la captación de agua y el almacenamiento para evitar tanto la escasez de agua como la sobrecapacidad de almacenamiento.

Tabla 35. Resultados escenario 1. Quibdó con 2.5m³ - precipitación del año más seco (2016)

Datos de entrada		
Población	5	Hab
Coefficiente de escorrentía (C)	0.9	Cubierta en zinc
Dotación (Res 844 de 2018)	80	l/hab*día
demanda diaria (80%)	0.32	m ³ /día
demanda diaria ducha (20%)	0.08	m ³ /día
Resultados		
área	80	m ²
Almacenamiento superior	0.25	m ³
Almacenamiento inferior	2.5	m ³
Observación		
El menor nivel de almacenamiento en el tanque es 0 m³, el día con mayor captación es 12.25m³, el área mínima es 80 m² y el volumen de almacenamiento mínimo es 2.75 m³.		
ALERTA DEFICIT		
Número de días de déficit	3	

El análisis realizado para el año 2016, el más seco en la serie histórica con un total de 7,290.1 mm de precipitación, muestra que el sistema de cosecha de aguas lluvias puede alcanzar un rendimiento óptimo con una combinación de un área de captación de 80 m²



y un almacenamiento total de 2.75 m³. Esta configuración genera un déficit de tan solo 3 días al año, lo que representa una solución altamente eficiente para las condiciones locales.

Un aspecto clave en el diseño es la fluctuación del almacenamiento en el tanque principal de 2.5 m³ esquematizada en el Gráfico 14. Este tanque experimenta variaciones significativas en su nivel de llenado durante el año, especialmente en los meses de menor precipitación. Sin embargo, estas fluctuaciones se mantienen dentro de límites aceptables gracias a la capacidad de captación proporcionada por el área fija de 80 m² y al soporte adicional del tanque de 250 litros, que ayuda a regular el suministro en períodos de alta demanda. La fluctuación también favorece la renovación del agua almacenada, mejorando su calidad al reducir la acumulación prolongada.

La capacidad de almacenamiento de 2.75 m³, compuesta por el tanque de 2.5 m³ y el tanque de 250 litros en una posición elevada, se presenta como una alternativa comercialmente viable. Esta disposición cumple una doble función: aporta altura para proporcionar presión al sistema y permite una gestión más eficiente del agua, como se puede ver en Ilustración 30. Corte Transversal vivienda modificada - fuente propia 2024 (REVIT).

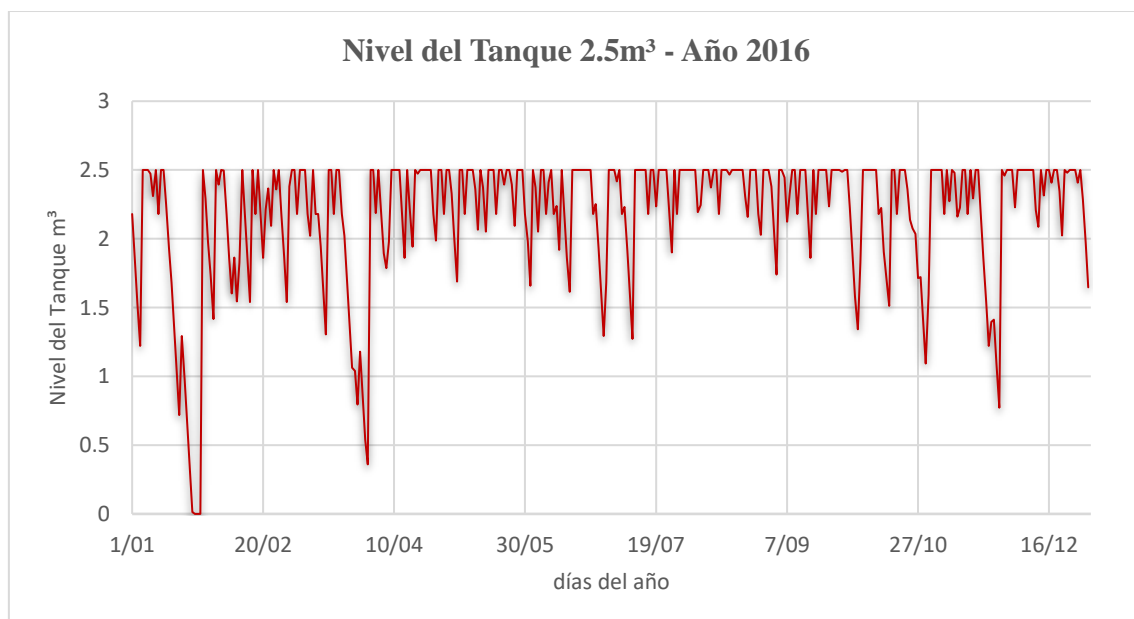


Gráfico 14. Nivel de Tanque 2.5m³ - Quibdó - año 2016

Esta combinación es la más óptima para este escenario, ya que minimiza los días de déficit, reduce costos operativos, mejora la calidad del agua debido a su renovación más frecuente y mantiene la simplicidad en la instalación del sistema. Además, al mantener el área de captación fija, el diseño logra un balance ideal entre la captación de agua y el



almacenamiento necesario, adaptándose a las necesidades de las viviendas rurales en Quibdó

- Escenario con datos del año con menor número de días lluviosos (2023):** Este escenario corresponde al año con el menor número de días lluviosos registrados, 2023, con 299 días de lluvia. Aunque la precipitación total fue moderada, la distribución desigual de las lluvias hace necesario aumentar tanto la superficie de captación como el volumen de almacenamiento para garantizar el abastecimiento de agua durante los días secos. Este escenario es crítico, ya que exige un diseño que maximice la eficiencia en la captación del agua y, al mismo tiempo, determine un volumen adecuado de almacenamiento para asegurar la disponibilidad del recurso durante los períodos sin lluvias. No obstante, como se discutió en capítulos anteriores, la optimización de este sistema debe enfocarse en reducir el volumen de almacenamiento para minimizar costos y mejorar la calidad del agua almacenada.

Tabla 36. Resultados escenario 1. Quibdó - precipitación del año con menor número de días lluviosos (2023)

Datos de entrada		
Población	5	Hab
Coefficiente de escorrentía (C)	0.9	Cubierta en zinc
Dotación (Res 844 de 2018)	80	l/hab*día
demanda diaria	0.32	m ³ /día
demanda diaria tanque superior	0.08	m ³ /día
Resultados		
Área	81	m ²
Almacenamiento Superior	0.25	m ³
Almacenamiento	2.5	m ³
Observación		
El menor nivel de almacenamiento en el tanque es 0.01 m³, el día con mayor captación es 10.65m³, el área mínima es 81 m² y el volumen de almacenamiento mínimo es 2.75 m³.		
CUMPLE		
Número de días de déficit	0	

El análisis para el año 2023, caracterizado por el menor número de días lluviosos (299 días), muestra que el sistema de cosecha de aguas lluvias puede operar eficientemente bajo ciertas condiciones. El volumen mínimo de almacenamiento requerido es de 2.75 m³, compuesto por un tanque principal de 2.5 m³ y un tanque de 250 litros que aporta altura y presión al sistema. El área de captación necesaria es de 81 m², mientras que el menor nivel de agua en el tanque principal registrado durante el año es de 0.01 m³. Por



otro lado, el día con mayor captación alcanzó los 10.65 m³, evidenciando la capacidad del sistema para manejar variaciones significativas en la precipitación.

Aunque el sistema no presenta déficit teórico en este escenario, es crucial tener precaución con el uso del agua, especialmente durante los períodos en que el nivel del tanque principal se acerca a su capacidad mínima. Un mal manejo del recurso hídrico, como el uso excesivo o no planificado, podría provocar un déficit en el sistema, afectando su funcionalidad y la disponibilidad de agua en momentos críticos.

La siguiente gráfica ilustra la fluctuación de los niveles de agua en el tanque principal de 2.5 m³ a lo largo del año 2023. En ella se observa cómo el sistema responde a las variaciones en la precipitación y la demanda diaria, mostrando los momentos en que el nivel del tanque se acerca a su capacidad mínima de 0.01 m³. Esta representación es clave para visualizar el comportamiento del sistema en términos de almacenamiento y resalta la importancia de monitorear y gestionar adecuadamente el recurso hídrico para evitar posibles déficits, especialmente en escenarios donde la cantidad de días lluviosos es menor y la disponibilidad de agua puede ser más vulnerable al mal uso.

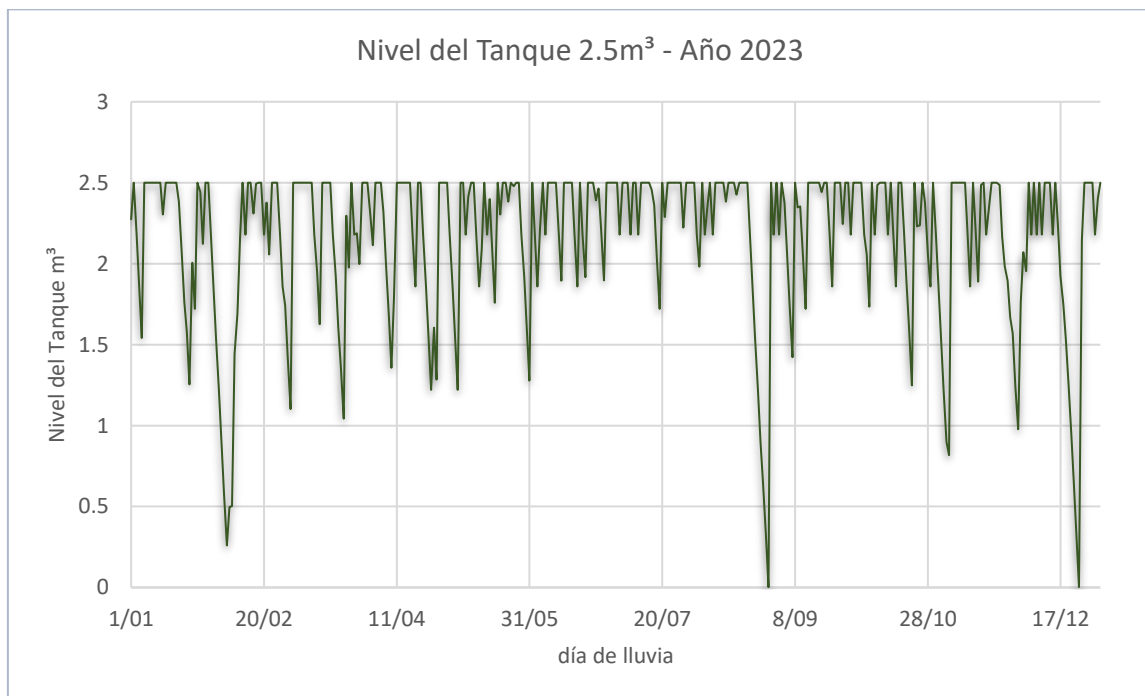


Gráfico 15. Nivel de Tanque 2.5m³ - Quibdó - año 2023

Por lo tanto, además de implementar un diseño eficiente, se recomienda acompañar este sistema con estrategias de sensibilización y educación para los usuarios sobre el uso responsable del agua, asegurando su sostenibilidad y efectividad incluso en condiciones climáticas adversas.



9.5.3. Escenario 2: Diseño de Sistema de Cosecha de Aguas Lluvias para Vivienda Rural existente – caso de estudio Quibdó - Chocó

En este escenario, se realiza el análisis de la adaptación del sistema de cosecha de aguas lluvias para una vivienda rural ya existente en el municipio de Quibdó, Chocó. Al igual que en el escenario anterior, el desafío radica en ajustar los sistemas de captación y almacenamiento en viviendas preexistentes, tomando en cuenta las limitaciones de espacio y las infraestructuras disponibles. El análisis se llevó a cabo considerando dos años representativos, con el fin de evaluar cómo las condiciones climáticas afectan la eficiencia del sistema de cosecha de aguas lluvias en viviendas existentes:

- Escenario con datos de precipitación del año más seco (2016):** En este escenario se analiza el año con la menor precipitación registrada en Quibdó, 2016, con un total de 7,290.1 mm. A pesar de que esta cifra es relativamente baja en comparación con otros años en la región, sigue siendo suficiente para la cosecha de aguas lluvias. Sin embargo, en este contexto, la adaptación del sistema debe centrarse en la necesidad de incrementar tanto la superficie de captación como el volumen de almacenamiento, ya que la cantidad de precipitación, aunque significativa, no es tan abundante como en años más lluviosos. La optimización del sistema, en este caso, se enfoca en maximizar la eficiencia en los días lluviosos, aprovechando al máximo cada evento de precipitación y gestionando adecuadamente el volumen de almacenamiento necesario para asegurar el abastecimiento durante los períodos secos. Este escenario destaca la importancia de equilibrar la captación de agua y el almacenamiento, evitando tanto la escasez de agua durante los períodos secos como la sobrecapacidad de almacenamiento, lo que implicaría costos adicionales y una posible afectación de la calidad del agua almacenada.

El análisis realizado para el año 2016, el más seco en la serie histórica con un total de 7,290.1 mm de precipitación, revela las siguientes conclusiones para el diseño del sistema de cosecha de aguas lluvias en viviendas rurales existentes en Quibdó:

Tabla 37. Resultados escenario 2. Quibdó con 4m³ - precipitación del año más seco (2016)

Datos de entrada		
Población	5	Hab
Coefficiente de escurrentía (C)	0.9	Cubierta en zinc
Dotación (Res 844 de 2018)	80	l/hab*día
demanda diaria	0.32	m ³ /día
demanda diaria ducha	0.08	m ³ /día
área	63.59	m ²
Resultados		
Almacenamiento superior	0.25	m ³
Almacenamiento inferior	4	m ³



Observación	
El menor nivel de almacenamiento en el tanque es 0.23 m³, el día con mayor captación es 9.74m³, el área mínima es 63.59 m² y el volumen de almacenamiento mínimo es 4.25 m³.	
CUMPLE	
Número de días de déficit	0

El análisis realizado para el año 2016, el más seco en la serie histórica con un total de 7,290.1 mm de precipitación, revela que, para garantizar que el sistema de cosecha de aguas lluvias no presente déficit, se requiere un almacenamiento de 4 m³. Este tipo de almacenamiento implica desafíos técnicos, ya que no existen tanques prefabricados comerciales de esta capacidad, por lo que sería necesario construir un tanque in situ o utilizar una combinación de dos tanques prefabricados de 2,000 litros cada uno. La disposición sugerida para este diseño incluye un tanque de 4,000 litros en la parte baja y un tanque adicional de 250 litros en una posición elevada para proporcionar altura y presión al sistema, como se evidencia en la Ilustración 30. Corte Transversal vivienda modificada - fuente propia 2024 (REVIT).

Tabla 38. Resultados escenario 2. Quibdó con 2.5m³ - precipitación del año más seco (2016)

Datos de entrada		
Población	5	Hab
Coefficiente de escorrentía (C)	0.9	Cubierta en zinc
Dotación (Res 844 de 2018)	80	l/hab*día
demanda diaria	0.32	m ³ /día
demanda diaria ducha	0.08	m ³ /día
área	63.59	m ²
Resultados		
Almacenamiento superior	0.25	m ³
Almacenamiento inferior	2.5	m ³
Observación		
El menor nivel de almacenamiento en el tanque es 0 m³, el día con mayor captación es 9.74m³, el área mínima es 63.59 m² y el volumen de almacenamiento mínimo es 2.75 m³.		
ALERTA DEFICIT		
Número de días de déficit	5	

Sin embargo, al comparar esta configuración con un diseño optimizado que utiliza un tanque comercial estándar de 2.5 m³, se encontró que este último genera un déficit de abastecimiento de agua de tan solo 5 días al año. Aunque esta alternativa presenta una ligera insuficiencia, resulta significativamente más viable, ya que reduce los costos al eliminar la necesidad de construcción in situ, y mejora la calidad del agua debido a la renovación más frecuente del almacenamiento. Para este sistema con almacenamiento de



2.5 m³, también se requiere el uso de un tanque adicional de 250 litros en una posición elevada para garantizar la presión del sistema.

El comportamiento de los niveles en el tanque se puede evidenciar en los gráficos Gráfico 16. Nivel de Tanque 2.5m³ - Quibdó - año 2016 y Gráfico 17. Nivel de Tanque 2.5m³ - Quibdó - año 2016.

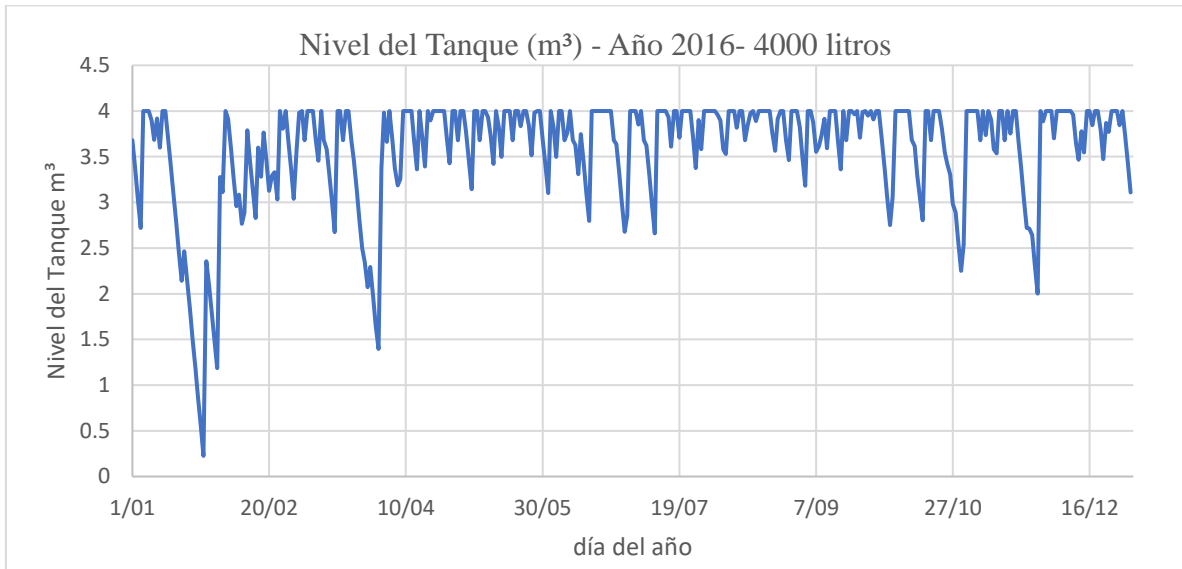


Gráfico 16. Nivel de Tanque 2.5m³ - Quibdó - año 2016

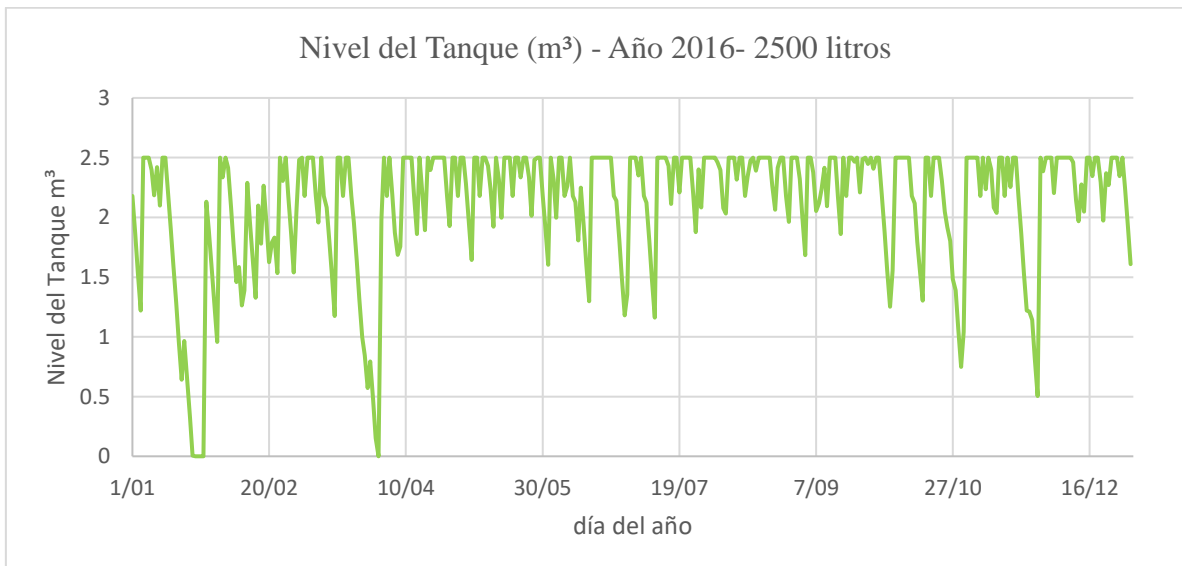


Gráfico 17. Nivel de Tanque 2.5m³ - Quibdó - año 2016

Dado que el déficit de 5 días es mínimo y puede ser gestionado mediante estrategias complementarias como el uso racional del agua, se recomienda la implementación del sistema con un tanque comercial de 2.5 m³ como la solución óptima. Este diseño balancea



eficientemente la reducción de costos, la calidad del agua y las necesidades de las viviendas rurales en Quibdó, adaptándose mejor a las condiciones locales. En este análisis, el área de captación se mantiene fija, subrayando la importancia de optimizar el almacenamiento para maximizar la eficacia del sistema dentro de las limitaciones existentes.

- Escenario con datos del año con menor número de días lluviosos (2023):** Este escenario se basa en el año 2023, que registró el menor número de días lluviosos en la serie histórica, con un total de 299 días de lluvia. Aunque la precipitación total de este año fue moderada, la distribución desigual de las lluvias crea un desafío adicional para el diseño del sistema de cosecha. La menor frecuencia de días lluviosos implica que, aunque se presenta lluvia en días específicos, no se puede confiar en una captación constante de agua. En este caso, es necesario aumentar tanto la superficie de captación como el volumen de almacenamiento para garantizar el abastecimiento continuo de agua durante los días secos. Este escenario es crítico debido a la importancia de maximizar la eficiencia en la captación y la necesidad de determinar un volumen adecuado de almacenamiento. Sin embargo, como se analizó en capítulos anteriores, la optimización en este caso debe buscar minimizar el volumen de almacenamiento para reducir los costos asociados y mejorar la calidad del agua almacenada, evitando la acumulación excesiva y los riesgos de contaminación.

Tabla 39. Resultados escenario 2. Quibdó con 3m³ - precipitación del año con menor número de días lluviosos (2023)

Datos de entrada		
Población	5	Hab
Coefficiente De Escorrentía (C)	0.9	Cubierta en zinc
Dotación (Res 844 De 2018)	80	l/hab*día
Demanda Diaria	0.32	m ³ /día
Demanda Diaria Ducha	0.08	m ³ /día
Área	63.59	m ²
Resultados		
Almacenamiento superior	0.25	m ³
Almacenamiento	3	m ³
Observación		
El menor nivel de almacenamiento en el tanque es 0.32347 m ³ , el día con mayor captación es 8.36m ³ , el área mínima es 63.59 m ² y el volumen de almacenamiento mínimo es 3.25 m ³ .		
CUMPLE		
Número de días de déficit	0	



El análisis para el año 2023, caracterizado por el menor número de días lluviosos registrados (299 días), demuestra que el sistema diseñado es altamente efectivo para captar y almacenar el agua necesaria para satisfacer la demanda sin generar déficits significativos. En este escenario, se determinó que, para evitar cualquier déficit en el sistema, el volumen de almacenamiento requerido es de 3 m³. Sin embargo, este volumen implica ciertos retos logísticos, ya que no existen tanques comerciales de 3 m³ disponibles en el mercado. Por lo tanto, se propone utilizar una configuración que combine dos tanques prefabricados: uno de 2 m³ y otro de 1 m³, complementados con un tanque adicional de 250 litros que aporte altura y presión al sistema.

En cuanto al área de captación, esta se mantiene constante en el diseño, siendo suficiente para proporcionar un aporte adecuado de agua durante los días de lluvia. La distribución de los tanques también es clave para garantizar una presión adecuada en la red de distribución, especialmente en las condiciones de menor disponibilidad hídrica.

Tabla 40. Resultados escenario 2. Quibdó con 2.5m³ - precipitación del año con menor número de días lluviosos (2023)

Datos de entrada		
Población	5	Hab
Coefficiente De Escorrentía (C)	0.9	Cubierta en zinc
Dotación (Res 844 De 2018)	80	l/hab*día
Demanda Diaria	0.32	m ³ /día
Demanda Diaria Ducha	0.08	m ³ /día
Área	63.59	m ²
Resultados		
Almacenamiento superior	0.25	m ³
Almacenamiento	2.5	m ³
Observación		
El menor nivel de almacenamiento en el tanque es 0 m³, el día con mayor captación es 8.36m³, el área mínima es 63.59 m² y el volumen de almacenamiento mínimo es 2.75 m³.		
CUMPLE		
Número de días de déficit	2	

Adicionalmente, se exploró una alternativa más práctica y económica utilizando un sistema con un volumen de almacenamiento total de 2.5 m³, un tamaño comercialmente disponible. Los resultados indican que con esta capacidad se generaría un déficit de tan solo 2 días a lo largo del año, lo que representa un rendimiento casi óptimo para el sistema. Esta opción ofrece ventajas significativas en términos de costos y simplicidad de



implementación, además de mejorar la calidad del agua al reducir los tiempos de almacenamiento prolongado.

En este escenario, el diseño destaca la importancia de una gestión adecuada del recurso hídrico. A pesar de que el sistema no presenta un déficit teórico en condiciones normales, los niveles básicos del tanque combinados con un mal uso del agua podrían ocasionar problemas de abastecimiento en el futuro. Por ello, es fundamental complementar el sistema con estrategias de sensibilización y educación para garantizar un uso responsable y eficiente del agua almacenada.

A continuación, se presentan las gráficas que ilustran el comportamiento de los niveles de almacenamiento en los tanques con capacidades de 3 m³ y 2.5 m³, respectivamente, bajo las condiciones del año con menor número de días lluviosos (2023). Estas representaciones visuales permiten observar las fluctuaciones diarias de los niveles de agua en cada sistema, destacando los momentos críticos en los que el almacenamiento se aproxima a los límites mínimos y máximos. Además, las gráficas ofrecen un análisis comparativo de ambas configuraciones, evidenciando cómo el sistema de 3 m³ logra evitar déficits, mientras que el de 2.5 m³ presenta ligeras limitaciones en ciertos días, aunque se mantiene dentro de parámetros aceptables. Este análisis gráfico es esencial para evaluar la viabilidad técnica y económica de cada opción y para tomar decisiones informadas sobre su implementación.

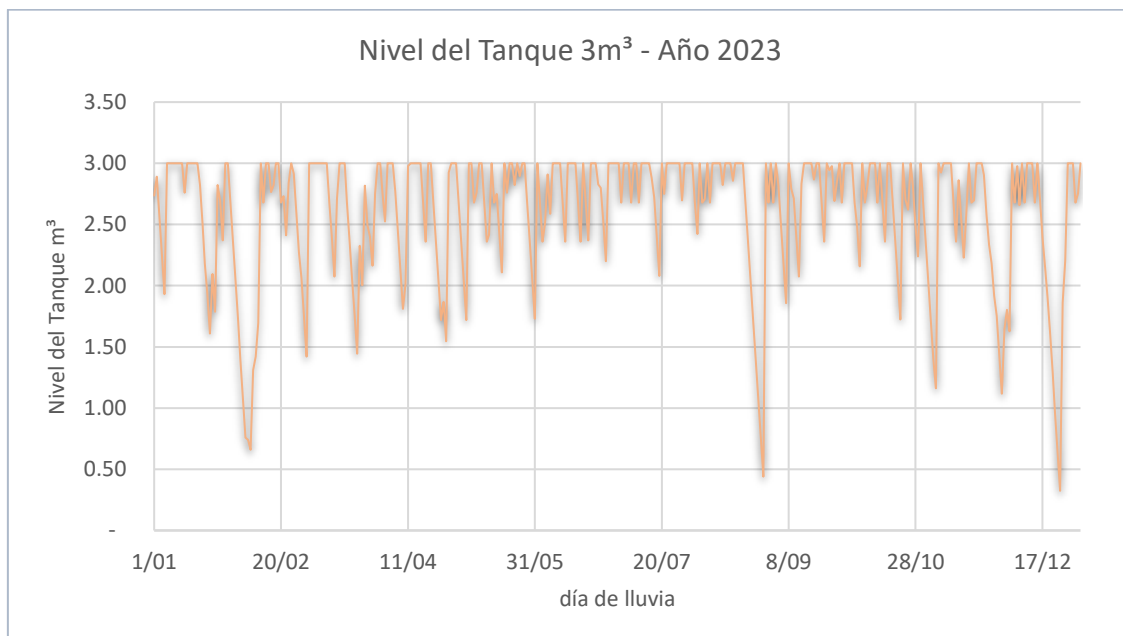


Gráfico 18. Nivel de Tanque 3m³ - Quibdó - año 2023

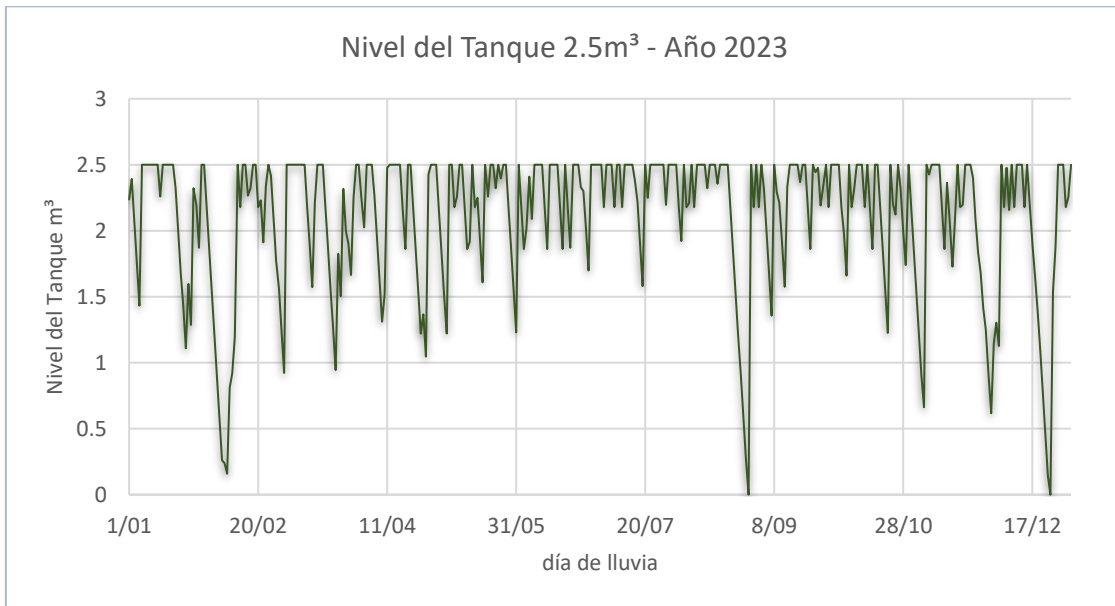


Gráfico 19. Nivel de Tanque 2.5m³ - Quibdó - año 2023



10. CONCLUSIONES

Colombia, gracias a su ubicación geográfica privilegiada, diversidad de relieve y variabilidad climática, presenta condiciones óptimas para la implementación de sistemas alternativos de abastecimiento de agua, apelando también a la abundancia de recursos hídricos, con un valor de escorrentía significativamente superior al promedio mundial y latinoamericano, posiciona al país como una región rica en fuentes de agua. Pese a esto Colombia presenta deficiencias importantes en la cobertura de agua, especialmente en comunidades rurales dispersas, generalmente por inviabilidad técnica y económica para la prestación del servicio de acueducto convencional.

El departamento del Chocó en el pacífico colombiano, con registros de precipitación anual que han alcanzado los 10000 mm, se destaca como áreas especialmente propicias para la implementación de tecnologías de cosecha de aguas lluvias. Estos altos niveles de precipitación, junto con el carácter tropical y húmedo del clima, crean condiciones ideales para la captación y almacenamiento sostenible del agua de lluvia como una fuente viable de abastecimiento de agua potable. En este contexto, se destaca la importancia de considerar las tecnologías de cosecha de aguas lluvias como una estrategia efectiva y sostenible para mejorar la disponibilidad en este departamento del país. La implementación de estos sistemas podría contribuir significativamente a la gestión sostenible de los recursos hídricos, especialmente en áreas con altas y constantes precipitaciones anuales, ofreciendo una solución adaptada a las condiciones climáticas y geográficas únicas de la nación.

Así las cosas, luego de analizar detalladamente las tecnologías de cosecha de aguas lluvias para zonas rurales con alta precipitación, se destaca la importancia de considerar aspectos técnicos, económicos y sociales. La viabilidad de estos sistemas depende de la adecuada planificación basada en datos de oferta y demanda de agua, así como de una inversión económica que asegure la implementación adecuada de la tecnología no convencional de abastecimiento en zonas rurales dispersas de Colombia que tengan altos niveles de precipitación en cantidad y en frecuencia. La participación activa de la comunidad y la evaluación precisa de costos totales son elementos clave para garantizar el éxito y la sostenibilidad de estos proyectos en áreas rurales específicas.

A través del análisis detallado de los casos de estudio en los municipios de Quibdó e Istmina, se concluye que estas regiones son altamente aptas para la implementación de tecnologías de cosecha de aguas lluvias debido a sus condiciones climáticas favorables, caracterizadas por un alto nivel de precipitación y una frecuencia de lluvias que supera los promedios nacionales. Estas condiciones permiten una captación eficiente del recurso hídrico, lo que convierte a la cosecha de aguas lluvias en una alternativa viable para mejorar el acceso al agua potable en zonas rurales dispersas, donde los sistemas de abastecimiento convencionales no son prácticos ni económicamente factibles.



La tecnología de cosecha de agua de lluvia se muestra altamente valiosa, especialmente en contextos donde el acceso a sistemas de abastecimiento tradicionales resulta inviable, ya que ofrece soluciones individuales que permiten llegar a las zonas más alejadas y de difícil acceso, en las que la construcción de sistemas convencionales no es una alternativa práctica.

Desde el punto de vista técnico, los sistemas de cosecha de agua son viables, ya que las condiciones climáticas del departamento del Chocó, con una elevada cantidad de precipitaciones y días lluviosos, favorecen la implementación de estos sistemas. Además, desde una perspectiva económica, la viabilidad es evidente, dado que la tecnología utiliza elementos que ya forman parte de una vivienda rural estándar, como el techo, las tuberías y los bajantes. Esto reduce los costos, haciendo que el sistema sea accesible, dado que se plantea un diseño basado en la reutilización de los componentes naturales de la vivienda para acceder al recurso hídrico.

En cuanto a la calidad del agua, se concluyó que solo es necesario potabilizar la pequeña cantidad destinada al consumo humano. Tras analizar diversas alternativas y desarrollar una matriz multicriterio que evaluara la eficiencia técnica, la viabilidad económica, la aceptación comunitaria y el cumplimiento del marco normativo, se propone el uso de filtros de arcilla impregnados con plata coloidal como la opción más adecuada para la potabilización. Este filtro, de bajo costo y con una durabilidad superior a los dos años, puede ser fabricado por las comunidades locales, lo que refuerza la sostenibilidad del sistema a largo plazo. Además, este tipo de filtro es capaz de eliminar los contaminantes presentes en las aguas lluvias, lo que lo hace especialmente adecuado para entornos rurales.

En Colombia, la gestión del recurso hídrico está respaldada por un marco normativo amplio y detallado, que asegura tanto la calidad del agua como su disponibilidad en diversas regiones del país. Para el desarrollo de esta investigación, se ha centrado la atención en la Resolución 844 de 2018 del Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio (MVCT), que establece los requisitos técnicos para los proyectos de agua y saneamiento en zonas rurales.

A lo largo de la investigación, se revisaron diversas normativas clave, como el Decreto 1541 de 1978 sobre la propiedad del agua, la Ley 142 de 1994 sobre servicios públicos, y la Resolución 2115 de 2007 sobre la calidad del agua. También se analizaron sentencias y jurisprudencia que refuerzan el agua como un derecho fundamental, así como los reglamentos técnicos relevantes, como la Resolución 330 de 2017 y la Resolución 799 de 2021. Sin embargo, la Resolución 844 de 2018 fue la base normativa más relevante para guiar los requisitos técnicos de los proyectos de cosecha de agua de lluvia en las zonas rurales.



Este marco normativo subraya la importancia del acceso al agua como un derecho humano fundamental, y aunque la cosecha de aguas lluvias es utilizada principalmente para consumo no potable en países como Estados Unidos, la Unión Europea, Brasil y Australia, en Colombia se reconoce su potencial para mejorar el acceso al agua en zonas rurales dispersas. A través de la implementación de sistemas adecuados de recolección y potabilización, y con el cumplimiento de los requisitos establecidos en la normativa, se puede garantizar que este recurso tan valioso sea accesible de manera eficiente y sostenible.

La metodología para el diseño de sistemas de cosecha de agua de lluvia emplea ecuaciones bien establecidas en la comunidad técnica y científica, como las ecuaciones de dotación de agua, balances hídricos y precipitación promedio mensual. Sin embargo, se organiza en un proceso metodológico detallado que proporciona un paso a paso para llegar a un diseño óptimo. Dado que se trata de una tecnología individual, no existe un resultado único y preciso; por lo tanto, el criterio del diseñador juega un papel fundamental en la implementación del diseño más adecuado.

Para aplicar y entender esta metodología, se desarrollaron dos casos de estudio: Istmina, en la cuenca del río San Juan, y Quibdó, capital del departamento del Chocó. Se utilizó como parámetro la vivienda de interés rural del Ministerio de Vivienda, con algunas modificaciones pertinentes para el caso de estudio. Esta metodología ofrece una estimación precisa, especialmente cuando se dispone de una mayor cantidad de datos. En la literatura y en los documentos técnicos se recomienda contar con al menos 10 años de datos de precipitación diaria, ya que entre más información se tenga, más preciso será el diseño.

A través de los estudios, se comprendió que, aunque parezca lógico que la cantidad de precipitación es el factor más importante, lo que realmente determina las circunstancias más críticas es la frecuencia de los días lluviosos. Por lo tanto, para un diseño adecuado, se debe considerar el año con menor cantidad de lluvia total y el menor número de días lluviosos, ya que estos son los escenarios más desafiantes para garantizar un abastecimiento constante de agua.



11. RECOMENDACIONES

En el desarrollo de esta investigación, se identificó una brecha significativa en la búsqueda de soluciones que aborden el acceso al agua potable de manera efectiva a gran escala. Si bien se han investigado numerosas tecnologías para la recolección y tratamiento del agua, muchas de ellas aún no han llegado a las comunidades rurales de manera efectiva. En este sentido, se observa que existe un nicho particularmente inexplorado dentro del contexto rural, donde las condiciones climáticas, sociales y culturales son distintas a las de las áreas urbanas. Aunque investigaciones previas han sido realizadas por importantes instituciones, como la Universidad de los Andes, la aplicación de estas tecnologías en las comunidades rurales sigue siendo un desafío no resuelto.

Por tanto, es fundamental que se continúen revisando y adaptando soluciones para diferentes contextos rurales. Esto implica un enfoque flexible y contextualizado, que considere las diversas condiciones climáticas, las costumbres locales, y las particularidades de cada región para garantizar la viabilidad y la aceptación de las tecnologías en el terreno.

Es crucial asegurar la participación activa de las comunidades rurales en la implementación de soluciones alternativas de abastecimiento de agua potable, como los sistemas de cosecha de agua de lluvia, ya que la capacitación en el uso y mantenimiento de estas tecnologías garantizará su sostenibilidad a largo plazo. Además, involucrar a las comunidades desde la fase de diseño permitirá que las soluciones propuestas se ajusten mejor a sus necesidades y costumbres, lo que incrementará la aceptación y eficacia del proyecto. Es igualmente importante que las políticas públicas, a pesar de los avances significativos realizados por el Estado, se alineen con las realidades de las zonas rurales y fomenten la adopción de tecnologías apropiadas. Esto debe ir acompañado de un financiamiento adecuado para la implementación de estos sistemas en áreas con recursos limitados, lo que facilitará el acceso de las comunidades rurales a soluciones sostenibles de agua potable.



12. BIBLIOGRAFIA

- Departamento Nacional de Planeación . (2023). *Lineamientos para la aplicación de programas de vivienda nueva rural de Orden Nacional*. Bogota: Republica de Colombia.
- Abbaszadegan, M., Hasan, M., Gerba, C., Roessler, P., Wilson, B., & Kuennen, R. (1997). The disinfection efficacy of a point-of-use water treatment system against bacterial, viral and protozoan waterborne pathogens. *Water Research*, 31, 574-582. Recuperado el 2023, de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043135496002631>
- Aguirre Morales, F. (2015). *Abastecimiento de Agua Potable para Comunidades Rurales*. Machala - Ecuador: Universidad Técnica de Machala.
- Albarracín Ortiz, C. A. (2023). *Evaluación económica de sistemas de aprovechamiento de aguas lluvias en zonas rurales andinas. Caso de estudio: vereda Garbanzal (Los Santos – Santander)*. (I. C. PhD Domínguez Rivera, Ed.) Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander.
- Auburn University. (2009). *INTRODUCCION A LA CAPTACION DEL AGUA*. Alabama USA: INTERNATIONAL CENTER FOR AQUACULTURE.
- Avellaneda Franco, M. I. (2020). *ESTADO DEL ARTE DE SISTEMAS DE ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE EN ZONAS RURALES DISPERSAS: ¿HACIA DÓNDE VA EL DESARROLLO TECNOLÓGICO?* (J. G. Saldarriaga Valderrama, Ed.) Bogota D.C.: UNIVERSIDAD DE LOS ANDES. Recuperado el 2023
- Bailey, B. A., Kottermair, M., Taboroši, D., & Jenson, J. W. (2018). Sustainability of rainwater catchment systems for small island communities . *Journal of Hydrology* , 137-146.
- Baird, J., Summers, R., & Plummer, R. (2013). Cisterns and safe drinking water in Canada. *Canadian Water Resources Journal / Revue canadienne des ressources hydriques*, 121-134.
- Banco Interamericano de Desarrollo (BID). (2019). *Acceso a servicios de agua y saneamiento en áreas rurales dispersas: camino a la universalización / Lourdes Álvarez*. Washinton D.C.: División de Agua y Saneamiento.



- Brown, j., & Sobsey, M. (2010). Microbiological effectiveness of locally produced ceramic filters for drinking water treatment in Cambodia. *Journal of Water and Health*, 1-10.
- Bruni, M., & Spuhler, D. (2018). *Slow Sand Filtration*. London: Sustainable Sanitation and Water Management (SSWM).
- Carvajal, A., Rísquez, A., Echezuría, L., Fernández, M., Castro, J., & Aurentis, L. (2019). Recomendaciones sobre el consumo de agua y alimentos en circunstancias especiales. *Comisión de Epidemiología. Sociedad Venezolana de Infectología*, 5-9.
- CENTRO DE AGUAS Y SANEAMIENTO AMBIENTAL . (2008). *MENU DE ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO A NIVEL COMUNITARIO Y DOMICILIARIO - Calidad del Agua en Sistemas de Abastecimiento en Poblaciones Rurales Dispersas*. Cochabamba - Bolivia : Universidad Mayor de San Simón .
- CORTE CONSTITUCIONAL. (2016). *PRINCIPIO DE PRECAUCION AMBIENTAL Y SU APLICACION PARA PROTEGER EL DERECHO A LA SALUD DE LAS PERSONAS-Caso de comunidades étnicas que habitan la cuenca del río Atrato y manifiestan afectaciones a la salud como consecuencia de actividades mineras ilegal*. Bogotá: REPUBLICA DE COLOMBIA.
- Corte Constitucional de Colombia. (2011). *Sentencia T-740/11 - DERECHO FUNDAMENTAL AL AGUA*. Bogota D.C.: Republica de Colombia.
- Cortes Samper, C. (2023). *ESTRATEGIAS DE DESARROLLO RURAL EN LA UE: DEFINICIÓN DE ESPACIO RURAL, RURALIDAD Y DESARROLLO RURAL*. Alicante: Universidad Alicante.
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística –DANE. (2018). *Entrega de resultados Censo nacional de población y vivienda (CNPV)*. Bogotá D.C.: DANE.
- Departamento de Planeación Nacional. (2014). *Definición de Categorías de Ruralidad*. Bogota D.C.: Dirección de Desarrollo Rural Sostenible.
- Departamento Nacional de Planeación . (2024). *Ficha Departamento de Chocó - Terridata*. Bogota: Republica de Colombia.
- Departamento Nacional de Planeación (DNP). (2017). *Construcción de vivienda de interés Social Rural*. Bogotá: Subdirección Territorial y de Inversiones Públicas.



- Departamento Nacional de Planeación. (2024). *Tipologías de las Entidades Territoriales para el Reconocimiento de Capacidades. Resultados para la Vigencia 2024*. Bogotá: Republica de Colombia.
- Despins, C., Farahbakhsh, K., & Leidl, C. (2009). Assessment of rainwater quality from rainwater harvesting systems in Ontario, Canada. *Journal of Water Supply: Research and Technology-Aqua*, ed 28, 117-134. Obtenido de <https://iwaponline.com/aqua/article/58/2/117/28976/Assessment-of-rainwater-quality-from-rainwater>
- Durán, M. (2016). *"Atrapa nieblas" la alternativa que combate la falta de agua*. Bogota D.C.: UNIVERSIDAD DE BOGOTA JORGE TADEO LOZANO. Obtenido de <https://www.utadeo.edu.co/es/noticia/emisora/emisora-oyeme-ujtl/7451/atrapa-nieblas-la-alternativa-que-combate-la-falta-de-agua>
- Farahbakhsh, K., Despins, C., & Leidl, C. (2009). Developing Capacity for Large-Scale Rainwater Harvesting in Canada. *Water Quality Research Journal*, ed 44, 92-102.
- Gobernación del Chocó. (2024). *Plan de Desarrollo 2024 - 2027 El Chocó en ruta hacia el progreso*. Quibdó: Gobernación de Chocó.
- Gómez Mosquera, W. (2017). *Abastecimiento de agua potable en comunidades rurales en el Chocó Biogeográfico: Aplicación de tecnologías no convencionales*. Medellín: Universidad Nacional de Colombia.
- guidance, E. (2011). *Guidance on use of rainwater tanks*. Australia: EnHealth.
- GUZMÁN CONDIA, L. E., & BARROS CERVANTES, H. F. (2018). *RECOLECCIÓN Y APROVECHAMIENTO DE AGUAS PLUVIALES, MEDIANTE SISTEMAS DE RECOLECCIÓN*. Bogotá D.C.: UNIVERSIDAD NACIONAL ABIERTA Y A DISTANCIA-UNAD.
- Hernandez Martínez, F. (2019). *Captación de agua de lluvia como alternativa para afrontar la escasez del recurso*. Oaxaca: México.
- Ibáñez Asensio, S., Moreno Ramón, H., & Gisbert Blanquer, J. M. (2009). *Métodos para la determinación del coeficiente de escorrentía*. Valencia: Universidad de Valencia.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). (2019). *Manual de Usuario Consulta y Descarga de datos hidrometeorológicos*. Bogotá: IDEAM.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). (2023). *Estudio Nacional del Agua 2022*. Bogotá D.C: IDEAM. Recuperado el 2023, de https://www.andi.com.co/Uploads/ENA%202022_compressed.pdf



- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (2018). *Protocolo de modelación hidrológica e hidráulica*. Bogotá : Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.
- Instituto de Investigaciones Ambientales del Pacífico - IIAP. (2017). *Plan Integral de Cambio Climático del Departamento del Chocó*. Chocó: Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.
- Kayser, B. (1990). La renaissance rurale. Sociologie des campagnes du monde occidental. *Revue française de sociologie*, 288-290.
- Khan, A. S. (2023). A Comparative Analysis of Rainwater Harvesting System and Conventional Sources of Water. *Water Resour Manage* 37, 2083-2106.
- Ledezma LLoreda, R. Y. (2015). *OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE CAPTACIÓN Y ALMACENAMIENTO DE AGUAS LLUVIAS DEL ACUEDUCTO COMUNITARIO DEL BARRIO ZONA MINERA, EN EL MUNICIPIO DE QUIBDÓ – CHOCÓ*. Bogotá: Universidad la Gran Colombia.
- Lerma Arias, D. (2012). *Filtros cerámicos, una alternativa de agua segura*. Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira.
- Lopez Cualla, R. A. (2003). *Elementos de diseño para acueductos y alcantarillados* (segunda ed.). Bogota: Escuela Colombiana de Ingeniería.
- López Trilleras, R. V., & Vera Suaza, L. L. (2014). *Cobertura en la prestación del servicio de acueducto en Colombia*. Bogota D.C.: UNIVERSIDAD DE LA SALLE.
- Martinez, A. S., Narchi, N. E., Leal Bautista, R. M., Martinez, O. F., & Casas Beltrán, D. A. (2020). Percepción y uso del agua de lluvia por usuarios en una comunidad del Caribe mexicano. *Sociedad y Ambiente*, núm. 23, 1-27.
- McAllister, S. (2005). *Analysis and Comparison of Sustainable Water Filters* . Madison: University of Wisconsin .
- Meera, V., & Ahammed, M. (2008). Solar disinfection for household treatment of roof-harvested rainwater. *Water Supply* , 153-160.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2022). *Lineamientos para potencializar el uso de agua lluvia*. Bogotá D.C.: Dirección de Gestión Integral del Recurso Hídrico.



- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2010). *Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico - Título J*. Bogotá D.C.: Viceministerio de Agua y Saneamiento.
- Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. (2018). *Resolución 844 DE 2018*. Bogotá : Colombia.
- Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. (2017). *Resolución 0330 de 2017*. Bogota D.C.: Colombia.
- MINISTERIO DE VIVIENDA, CIUDAD Y TERRITORIO. (2017). *RESOLUCIÓN 330 DE 2017*. Bogota: MINISTERIO DE VIVIENDA, CIUDAD Y TERRITORIO.
- MINISTERIO DE VIVIENDA, CIUDAD Y TERRITORIO. (2018). *RESOLUCIÓN 844 DE 2018*. Bogotá: MINISTERIO DE VIVIENDA, CIUDAD Y TERRITORIO.
- Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. (2021). *Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico - Título J*. Bogotá: Viceministerio de Agua y Saneamiento Básico.
- Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. (2021). *Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico - Título J*.
- Mora Alvarado, D., Barboza Topping, R., & Orozco Gutiérrez, J. (2019). Índice de calidad y continuidad de los servicios de agua para consumo humano en Costa Rica. *Tecnología en Marcha*, 72-81.
- Mora Villalobos, C. A. (2021). Definiciones, dimensiones y precisiones. *Magazín Ruralidad y Territorialidades Vol.1 N°7*, 9.
- Moreno Lozano, D. (2020). *METODOLOGÍA DE DIMENSIONAMIENTO DE UN SISTEMA DE RECOLECCIÓN DE AGUAS LLUVIAS CON UN MECANISMO DE SEPARACIÓN DE PRIMER FLUJO VARIABLE*. Bogotá D.C.: Universidad de Los Andes.
- Moreno Méndez, J. O. (2020). LOS RETOS DEL ACCESO A AGUA POTABLE Y SANEAMIENTO BÁSICO DE LAS ZONAS RURALES EN COLOMBIA. *Revista De Ingeniería*, 28 - 37.
- Murillo López, W., Córdoba Machado, S., & Palomino Lemus, R. (2008). *Comportamiento de la precipitación y cuantificación del balance hídrico en la cuenca alta del río Atrato en el departamento del Chocó*. Quibdó: Instituto de Investigaciones Ambientales del Pacífico "John Von Neumann" (IIAP).



- Murillo López, W., Córdoba Machado, S., & Palomino Lemus, R. (2008). *Comportamiento de la precipitación y cuantificación del balance hídrico en la cuenca alta del río Atrato en el departamento del Chocó*. Quibdó: Instituto de Investigaciones Ambientales del Pacífico "John Von Neumann" (IIAP).
- Nachson, S. C., V., S., Ben-Hur, M., Kurtzman, D., Netzer, L., & Livshitz, Y. (2022). New modelling approach to optimize rainwater harvesting system for non-potable uses and groundwater recharge: A case study from Israel. *Sustainable Cities and Society*, 85.
- Ordoñez Galvez, J. J. (2011). *Cartilla Técnica: Balance Hídrico Superficial* (Primera ed.). (F. P.-G. Perú, Ed.) Lima, Peru: Sociedad Geográfica de Lima. Recuperado el 2023, de https://www.gwp.org/globalassets/global/gwp-sam_files/publicaciones/varios/balance_hidrico.pdf
- Organización Mundial de la Salud (OMS). (1 de julio de 2021). *Miles de millones de personas se quedarán sin acceso a servicios de agua potable, saneamiento e higiene antes de 2030 a menos que el progreso se multiplique por cuatro, advierten la OMS y UNICEF*. Obtenido de OMS: comunicados de prensa: <https://www.who.int/es/news/item/01-07-2021-billions-of-people-will-lack-access-to-safe-water-sanitation-and-hygiene-in-2030-unless-progress-quadruples-warn-who-unicef>
- Organización Mundial de la Salud (OMS). (13 de septiembre de 2023). *Water, sanitation, hygiene, waste and electricity services in health care facilities: progress on the fundamentals. 2023 global report*. Geneva: World Health Organization and the United Nations Children's Fund (UNICEF). Obtenido de <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/drinking-water>
- Organización Mundial de la Salud. (2009). *El derecho al agua*. Ginebra: OMS.
- Organización Mundial de la Salud. (2021). *Comprender las dimensiones del problema del agua*. Mexico: ONU-Habitat. El Programa de las Naciones Unidas para los Asentamientos Humanos.
- Organización Panamericana de la Salud. (2004). *GUÍA DE DISEÑO PARA CAPTACIÓN DEL AGUA DE LLUVIA*. Lima: Organización Mundial de la Salud.
- Organización Panamericana de la Salud. (2004). *GUÍA DE DISEÑO PARA CAPTACIÓN DEL AGUA DE LLUVIA*. Lima: Organización Mundial de la Salud (OMS).
- Presidencia de la Republica de Colombia. (2007). *Decreto 1575 de 2007*. Bogota D.C.: Colombia.



- Rainwater harvesting systems for urban developments. (2015). En A. K. Sharma, D. Begbie, & T. Gardner, *Rainwater Tank Systems for Urban Water Supply* (pág. 342). London: IWA Publishing.
- Ramirez Escobar, C. A., & Buriticá Arboleda, C. I. (2021). Prototipo de cosecha inteligente de agua lluvia para mejorar la eficiencia energética residencial en Bogotá. *Tecnura V. 25(69)*, 171-195.
- Ricardo Calzadilla, M. P., Méndez Fernández, M., Bonet Pérez, C., Sierra Castellanos, L. O., & Cutié, V. (2015). Evaluación de la eficiencia de la captación de agua de lluvia en casas de cultivos. *REVISTA INGENIERÍA AGRÍCOLA, Vol 5*, 3-9.
- Rodríguez Díaz, E. d. (2017). *Modelo de Desarrollo a Largo Plazo en la 5 Subregiones el Departamento del Chocó (Darién, Atrato, San Juan, Baudó, Pacífico)*. Quibdó: Universidad Nacional Abierta y a Distancia - UNAD .
- Sacyr Concesiones. (01 de 08 de 2015). *Planta Desaladora de Perth*. Obtenido de Proyectos: Australia: : <https://www.sacyrconcesiones.com/es/-/southern-seawater-desalination-plant>
- Schemenaue, R., & Cereceda, P. (2013). *Captación de agua de niebla para reforestación en Perú y Bolivia*. Lima.
- Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México (Sedema). (2020). *COSECHAR LA LLUVIA: MANUAL PARA INSTALAR UN SISTEMA DE CAPTACIÓN PLUVIAL EN TU VIVIENDA*. Ciudad de México: Gobierno de la Ciudad de México.
- Shrestha, R., Dangol, B., & Spuhler, D. (2018). Point of Use Water Treatment - Chlorination. *Sustainable Sanitation and Water Management (SSWM)*, Toolbox.
- Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios. (2022). *Informe Sectorial de los Servicios Públicos Domiciliarios de Acueducto y Alcantarillado vigencia 2021*. Bogotá D.C.: Grupo de Estudios Sectoriales.
- Superintendencia de servicios públicos domiciliarios. (20 de mayo de 2023). Chocó merece servicios públicos dignos y el Gobierno del Cambio le apuesta a esta deuda histórica: Superservicios. *Sala de Prensa*, págs. <https://www.superservicios.gov.co/Sala-de-prensa/noticias/choco-merece-servicios-publicos-dignos-y-el-gobierno-del-cambio-le-apuesta-esta-deuda-historica-superservicios>.
- Torres Hugues, R. (2019). La captación del agua de lluvia como solución en el pasado y el presente. *Hidráulica y Ambiental, ed. 40*, 125 - 139. Obtenido de



http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1680-03382019000200125&lng=es&tlng=es

Umapathi, S., Butler, R., Fergusin, M., Pezzaniti, D., & Sharma, A. (2015). *Monitoring of household rainwater tank systems for rainwater usage*. IWA Publishing.

UNICEF. (2017). *Agua potable gestionada en forma segura*. Ginebra: OMS.

United States Geological Survey. (2012). *Earth's water distribution*. Boston: U.S. Department of the Interior.

Universidad Nacional de Colombia. (27 de julio de 2022). El Chocó: radiografía de un departamento que resiste el abandono estatal. *Periódico UNAL*, págs. <https://periodico.unal.edu.co/articulos/el-choco-radiografia-de-un-departamento-que-resiste-el-abandono-estatal/>.

Vialle, C., Sablayrolles, C., Lovera, M., & Christine Huau, M. (2011). Modelling of a roof runoff harvesting system: The use of rainwater for toilet flushing. *Water Science & Technology Water Supply*, ed 11, 151.

Villarreal, E. L., & Dixon, A. (2005). Analysis of a rainwater collection system for domestic water supply in Ringdansen, Norrköping, Sweden. *Building and Environment*, vol40, 1174-1184.