

**EVALUACIÓN DE FACTIBILIDAD PARA LA INSTALACIÓN DE UNIDADES
HIDRÁULICAS COMO REGULADORAS DEL FLUJO HÍDRICO EN LOS ÚLTIMOS
SIETE KILÓMETROS DE CAUCE EXORREICO EN LA CUENCA BAJA DEL RIO
MANZANARES EN SANTA MARTA, COLOMBIA, DURANTE EL PERIODO 2018 -
2019.**

JUAN DAVID ORTEGA ARBELAEZ.

**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGIAS
ESPECIALIZACIÓN EN ORDENAMIENTO Y GESTIÓN INTEGRAL DE CUENCAS
HIDROGRÁFICAS
BOGOTÁ D. C., JULIO – 2019.**

**EVALUACIÓN DE FACTIBILIDAD PARA LA INSTALACIÓN DE UNIDADES
HIDRÁULICAS COMO REGULADORAS DEL FLUJO HÍDRICO EN LOS ÚLTIMOS
SIETE KILÓMETROS DE CAUCE EXORREICO EN LA CUENCA BAJA DEL RIO
MANZANARES EN SANTA MARTA, COLOMBIA, DURANTE EL PERIODO 2018 -
2019.**

JUAN DAVID ORTEGA ARBELAEZ.

**Trabajo de grado para obtener el título de Especialista en Ordenamiento y Gestiona
Integral de Cuencas Hidrográficas.**

Asesor: Msc. BETSY BELLO NOVOA.

**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGIAS
ESPECIALIZACIÓN EN ORDENAMIENTO Y GESTIÓN INTEGRAL DE CUENCAS
HIDROGRÁFICAS
BOGOTÁ D. C., JULIO – 2019.**

Dedicatoria.

Sin ponderación de afecto, a todos los que han batallado a mi lado en estos 40 años, en ocasiones venciendo y en otras probando la inclemencia de la derrota... pero siempre dejando densas gotas de esfuerzo en el camino hacia la efímera victoria.

...Por que un hombre sin familia, es solo un ser a la deriva.

Espacio para página de aceptación.

TABLA DE CONTENIDO

Resumen.....	8
Introducción.....	10
Antecedentes.....	12
Justificación.....	15
Formulación del problema.....	17
Figura 1. Índice de uso de agua para condiciones de año seco en Colombia Santa Marta. Ideam (2014).	18
Figura 2. Árbol del problema (causa-efecto) para el caso de estudio	19
Figura 3. Comportamiento exorreico de los cauces y cuencas que abastecen a Santa Marta.....	21
Delimitación del problema.....	21
Identificación del problema.	23
Pregunta de investigación.....	26
Preguntas directrices del problema.	26
Objetivos	26
Objetivo general.....	26
Objetivos específicos:	27
Marco Teórico	27
Marco Referencial.....	27
Diagnóstico Ambiental:	27
Localización general:	28
Localización área de estudio:	30
Uso del suelo.....	31
Marco Conceptual.....	32
Marco legal.	38
Metodología.....	40
Enfoque Investigativo:	40
Matriz metodológica general.	41
Contexto metodológico.	43
Bases metodológicas de la investigación.	44
Forma de investigación.....	44
Tipo de investigación.....	44
Línea de la investigación.....	45
Enfoque.....	45

Método	45
Propósito de la investigación.	45
Desarrollo metodológico.....	46
Localización de la investigación.	46
Parámetros Meteorológicos.....	50
Experimentación.	55
Población:	56
Muestreo.	57
Modelo experimental.	59
Propósito específico del experimento.	60
Elementos del Modelo Experimental.....	60
Factores.....	60
Índice del Uso del Agua.....	61
Capacidad de Retención Hídrica (Se establece un paralelo asociándolo directamente con el IRH)...61	
Factores Bloque.	62
Factores Ruido.	64
Modulo Experimental.	64
Unidades experimentales y tratamientos.....	64
Unidad experimental.....	65
Modelo Experimental:	69
Idealización de escenarios y relaciones.....	70
TRABAJO DE CAMPO.....	74
Flujo lógico del trabajo en campo.....	75
Apiques a cielo abierto:.....	76
Construcción de parcelas:	78
Muestreo e información primaria.....	79
Determinación de la pendiente.....	80
Determinación de la humedad del suelo.	80
Determinación de la capacidad de infiltración del terreno.....	82
Determinación de la precipitación.	83
Determinación de la evaporación.....	84
Determinación de la temperatura y velocidad del aire.....	85
Determinación de la temperatura y humedad del suelo.	86

Resultados preliminares en variables de interés.....	87
Caculo de variables morfometricas del área de estudio.....	87
Variables determinadas en campo.....	88
Otras variables de campo.....	90
Experimentación.....	93
Factores tratamiento con efecto sobre la variable de respuesta.....	93
Experimentación bajo dos escenarios.....	94
• Cuenca exorreica sin unidades de regulación. (Cuenca #1):.....	94
• Cuenca exorreica con unidades de regulación. (Cuenca #2):	95
Construcción de las unidades experimentales.....	95
Ensayos.....	97
Ensayo Cuenca#1 (Unidad experimental 1).....	98
Ensayo Cuenca#2 (Unidad experimental 2).....	100
Resultados de los aportes volumétricos para cada escenario.....	103
Balance de volúmenes sin unidades hidráulicas de regulación. Cuenca #1.....	104
Balance de volúmenes con unidades hidráulicas de regulación. Cuenca #2.....	105
Resultados.....	106
Balance final de masas por escenarios.....	107
Cuenca #1. Sin unidades hidráulicas de regulación.....	107
Cuenca #2. Unidades hidráulicas de regulación.....	108
Análisis de relaciones porcentuales entre “Cuencas”.....	110
Resultados Índices Hídricos.....	111
Análisis integrado de los Indicadores Hídricos.....	112
Proyección mediante un ejercicio de simulación.....	114
Preguntas de investigación.....	119
Conclusiones.....	121
Recomendaciones.....	123
Referencias bibliográficas.....	125

Resumen.

El presente trabajo tuvo como propósito generar espacios de evaluación y validación de factibilidad técnica, en cuanto a la disminución del Índice de Vulnerabilidad al Desabastecimiento Hídrico en una porción de territorio de la cuenca baja del río Manzanares, en Santa Marta (Colombia), entre los años 2018 y 2019. El estudio fue soportado en la modificación de las tasas de retención hídrica, validando la factibilidad en la instalación de unidades hidráulicas de regulación sobre la sección transversal del cauce de escurrimiento principal, en los últimos siete kilómetros de esta cuenca de carácter exorreico. Los ensayos experimentales se realizaron desde un modelo a escala 1:50 del área representativa, donde de acuerdo con la alteración de los cursos de esorrentía superficial hacia las unidades hidráulicas de regulación, se logró generar cambios favorables sobre el índice de vulnerabilidad al desabastecimiento hídrico. Los resultados obtenidos de ejercicios experimentales fueron utilizados para generar proyecciones sobre el área de estudio ubicada en el sector Noroccidental de la ciudad de Santa Marta (barrio San Martín) y así con estos resultados poder extrapolar y proyectar la capacidad de modificación hídrica sobre los últimos kilómetros de cauce principal exorreico de la cuenca en mención.

Para llegar a la verificación sobre la pertinencia en la instalación de unidades hidráulicas de regulación como medio para conseguir porcentajes favorables en la disminución de índice de Vulnerabilidad al Desabastecimiento Hídrico, se adelantó un trabajo integral fundamentado en el conocimiento previo de las condiciones significativas del área de estudio en los cerros de Punta Betón dentro de la cuenca baja del río Manzanares.

Mediante el análisis de variables de condicionamiento como el aumento de la capacidad de retención hídrica a partir de manipulaciones antrópicas y la alteración sobre la escorrentía superficial luego de un fenómeno de precipitación simulada, fue posible evidenciar y comprobar como con la instalación de sistemas para la captación y regulación de volúmenes de escorrentía en cauces de escurrimiento, es posible disminuir el índice de vulnerabilidad al desabastecimiento hídrico de “Muy Alto” a “Medio-Bajo” por un periodo limitado de tiempo. Con esta disminución y de acuerdo a proyecciones basadas en los resultados, sería posible beneficiar una población de 178.00 habitantes, asentada en los últimos siete kilómetros del cauce de escurrimiento a la bahía de Santa Marta, con el abastecimiento hídrico vital por tiempos que superan los 20 días. Lo anterior bajo el principio de tasas de captación y oferta hídrica equilibrada de las unidades hidráulicas de regulación

La capacidad de captación y regulación aportada por las unidades hidráulicas a la cuenca en los cauces de escurrimiento principal, contribuirán con la estabilización parcial de los estados de desabastecimiento en la zona Noroccidental de la ciudad, representada en este caso por el barrio San Martin. Todo deberá ser sustentado con la ejecución de pruebas a escala media, respetando las tasas de captación y las relaciones porcentuales entre áreas aportantes y áreas de retención de escorrentía.

Palabras Clave: Regulación flujos hídricos, desabastecimiento hídrico, cueca exorreica, tasa efectiva de regulación, cerro Punta Betín, unidades hidráulicas.

Introducción.

Una cuenca hidrográfica ofrece la opción al *observador* de analizarla como un elemento constitutivo del territorio, inmerso dentro de un sistema de interacciones e interrelaciones donde cada entrada tiene la posibilidad de generar una o varias salidas, ya sean positivas o negativas que finalmente derivaran en una presión específica (primaria o secundaria) sobre cada receptor presente en el territorio. De otra manera el mismo *observador* podrá ver la misma cuenca desde una mirada mecanicista, focalizando cada elemento constitutivo como un “átomo” que hace parte de la sumatoria de componentes particulares que aportan al desarrollo y funcionalidad de estos sistemas hídricos. (Ortega, 2019).

Considerándola como esa “porción del territorio”... la cuenca hidrográfica se presenta como un sistema complejo que además de su estructura y función tiene la capacidad de desarrollar especificidades dependiendo del punto geográfico donde se encuentre, con la modificación y adaptación de los sistemas biótico, abiótico y antrópico, potencializando o restringiendo el desarrollo del territorio. Esta interesante condición es el punto de partida para formular proyectos de investigación, estudio y evaluación del comportamiento particularizado de las cuencas y de cómo ese comportamiento afecta o beneficia a los demás sistemas que se reciben directa o indirectamente los servicios ecosistémicos de la zona. (Ortega, 2019)

El *observador* entonces deberá enfocarse en el diseño claro y específico de un experimento fundamentado en pruebas, que a su vez logre proporcionar datos susceptibles de ser analizados estadísticamente y arroje evidencias objetivas desde sus variables de salida. Con lo anterior se acercará más a investigar la influencia simultánea de varios factores, donde el control o análisis

preciso de condicionamiento de las variables de ruido es fundamental en el estudio y desarrollo de experimentos a campo abierto. Es esa condición la que despierta en el *observador* la necesidad de resolver un problema o demostrar una idea, desde la manipulación sistemática y ordenada (método científico) de los materiales, métodos y condiciones de operación de ese sistema estudiado. Es entonces en ese momento cuando la experimentación eficaz, vista desde un enfoque de respuesta rápida a interrogantes planteados con rangos de tiempo relativamente cortos, así como recursos económicos y humanos restringidos, puede finalmente encontrar alternativas de fondo que sean ante todo funcionales, eficientes y generen cambios positivos para las entradas y salidas de la cuenca, fundamentado siempre en el desarrollo sostenible y equilibrado del territorio.

Antecedentes.

La crisis por desabastecimiento de agua en la ciudad de Santa Marta, asociada a factores de consumo en cantidad y calidad no es nueva. Sin embargo, los esfuerzos realizados hasta ahora no contemplan o han contemplado alternativas viables, innovadoras, no convencionales y factibles desde el punto de vista de la dependencia o condicionamiento de las fuentes convencionales. Esta probablemente podría ser la causa raíz de este problema, ya que las alternativas funcionales deben contemplar proyectos fundamentados en bases técnicas y científicas, que permitan una autonomía gradual sobre la problemática.

El Departamento Nacional de Planeación (DNP) en el año 2017 presenta un diagnóstico que abre la discusión con un planteamiento bastante claro “En Santa Marta los usuarios sin conexión al servicio de agua potable gastan más dinero en conseguir el agua, que lo que pagan los usuarios con el servicio”, esto, aunque suene lógico plantea un reto en términos de abastecimiento en ciudades costeras como esta.

El estudio realizado en enero de 2017 por el DNP, muestra que en Santa Marta más de 18.000 hogares no cuentan con el servicio de agua potable y que las fuentes alternativas de abastecimiento de estas familias, puede traer consecuencias graves a la salud. Sumado a esto la calidad del agua para los usuarios que cuentan con el servicio, no cumple los estándares mínimos de calidad en el 100% del año, generando con esto enfermedades (sobre todo) en niños menores de 5 años. Por su parte el IRCA ha llegado a porcentajes hasta del 11%, donde la conclusión es que el agua no es apta para consumo humano.

Con cifras en cobertura de solo el 83% en servicio de agua potable y pérdidas que alcanzan más del 50%, la ciudad enfrenta una crisis y se encuentra (la ciudad) rezagada en comparación a otras ciudades de la costa Caribe Colombiana. Finalmente, la continuidad del servicio de agua potable solo alcanza el 85% de un día de 24 horas. (Departamento Nacional de Planeación [DNP], 2017)

Dentro del estudio que realiza el DNP en el año 2017, se muestran las fuentes de abastecimiento de aguas superficiales para la ciudad de Santa Marta, donde en época lluviosa el río Piedras y Manzanares aportan el 50% de la oferta total, la cual de acuerdo al estudio del DNP en el año 2017, se encuentra calculada en 1.584 L/s y se maneja con una sola planta de potabilización. Por otro lado, el río Gaira aporta el 28%, mientras que el 22% restante es aportado por fuentes subterráneas. (DNP, 2017)

Ahora bien, para la temporada seca el río Piedra y Gaira son los únicos afluentes con caudal, aportando solo el 14% del total de la oferta en época lluviosa, razón por la que es necesario hacer un “Alto” en este análisis que realiza el DNP, ya que no hay un estudio técnico que permita establecer si las condiciones y el comportamiento del río Manzanares aguas abajo de la captación o de la PTAP (Planta de Tratamiento de Agua Potable), podrían surtir algo del caudal demandado en las dos épocas.

La situación de las fuentes de abastecimiento en contraste con la demanda de 2.314 L/s, evidencia como la ciudad de Santa Marta permanentemente se encuentra en un estado de vulnerabilidad al desabastecimiento hídrico, con un IUA siempre mayor al 100% y un déficit en época de sequía, de más del 53% de la demanda. Los datos precisos del estudio (Estudio DNP;2017) presenta una problemática que más allá de la infraestructura, la calidad y la gestión que se realiza sobre el agua, se encuentra directamente relacionada con la cantidad disponible y

los pocos o casi nulos esfuerzos por buscar alternativas no convencionales de captación y principios de regulación hídrica naturales o inducidos.

Dentro de las alternativas que plantea el estudio del DNP; 2017, y bajo el objetivo de “Abastecer permanentemente de agua potable e incrementar la cobertura y calidad de este servicio en la ciudad de Santa Marta”, se plantean dos fases por parte de la alcaldía distrital, donde la alternativa más viable se fundamenta en la inclusión al sistema de nuevas fuentes de captación (Rio Toribio /Magdalena), así como una nueva planta de tratamiento en el cauce del rio Piedras. Las alternativas finalmente permiten cubrir en época de lluvia las demandas en un 100% o hasta un 183%, condición que, aunque soluciona el problema en épocas climáticas puntuales, no estaría aprovechando los volúmenes de agua que seguirían perdiéndose al mar por la condición exorreica de las cuencas.

Estos caudales de acuerdo a datos expuestos en el informe del DNP para el año 2017, se podrían calcular hasta en 2.000L/s, volúmenes de agua que no podrían ser regulados para su posterior aprovechamiento. El estudio afirma que, de acuerdo a las soluciones planteadas, a partir del año 2022 habría suficiente agua para incrementar la continuidad del servicio, sin que esto se encuentre asociado a un uso racional y mejor pensado del recurso hídrico desde el potencial de cada una de las cuencas aportantes.

El estudio del DNP para el año 2017, infortunadamente, presenta soluciones poco innovadoras, sustentables o no convencionales, al contrario de esto desarrolla soluciones a partir de una problemática evidente con una solución evidente, donde no se puede observar la integración de los elementos de la cuenca desde un enfoque sistémico, incluyendo de manera esencial el componente de regulación hídrica, ya sea natural o inducido, el cual (tomando en cuenta la

relación entre índices hídricos) aportaría la mitad de la solución, ya que el otro 50% lo representa el Índice de Uso del Agua, que para este análisis permanece constante.

En síntesis, todo se reduce a cuanto, como y donde puedo regular, para disminuir los impactos negativos que hoy aportan las pérdidas de agua al mar en la solución al problema de abastecimiento de la ciudad costera de Santa Marta.

Datos y análisis realizados, se soportan con el documento “APP de acueducto y alcantarillado de Santa Marta”; Departamento Nacional de Planeación DNP, enero de 2017.

Justificación.

El estudio plantea la utilización de Unidades de Regulación Hídrica, compuestas por canales y tanques de equilibrio, ubicados transversalmente al flujo de escorrentía superficial en los drenajes de 1^{er} y 2^{do} orden o de escurrimiento principal (En el caso del río Manzanares), muchos de ellos sobre el casco urbano de la ciudad. Estas unidades tendrán como función captar los remanentes por escorrentía superficial (Luego de las perdidas por saturación de suelo y captación hacia plantas de tratamiento) almacenarlos, conducirlos a los sistemas de acueducto y abastecer por medio de caudales regulados y en tiempos determinados, volúmenes de agua de acuerdo a las demandas antrópicas puntuales de los asentamientos cercanos a las áreas aportantes de aprovechamiento (esto dentro de un contexto general del problema).

Esta condición hídrica “efímera”, dada la condición geomorfológica y geografía del territorio, no permite actualmente el aprovechamiento de masas de agua generadas por precipitación pluvial en tiempo sostenido en la última línea del cauce del río manzanares, terminando estos volúmenes en la bahía de Santa Marta.

La importancia del estudio y su posibilidad de aplicación a mediana y gran escala, se fundamenta en el potencial aumento de la capacidad de retención hídrica de esta parte de la cuenca, logrando disminuir el Índice de Vulnerabilidad al Desabastecimiento Hídrico, de “Muy Alto” a “Medio”. El resultado en el aumento de la retención hídrica, sería el abastecimiento sin intermitencia de servicio y sobre los volúmenes mínimos vitales (90 L/hab.día) de comunidades de hasta 100.000 habitantes por tiempos que superarían los 20 días. El diseño, instalación y operación de estas unidades hidráulicas de regulación, serán sustentados a partir de tasas de regulación resultantes de ensayos a escala, relación porcentual en áreas superficiales y caudales medios por unidades específicas de abastecimiento temporal.

Estos sistemas hidráulicos, podrían equilibrar el problema de desabastecimiento de agua que la ciudad padece a diario, entre otras factores por la “cómoda” ubicación de las bocatomas del servicio de acueducto, las cuales “dejan por fuera” casi 24 Km² de área aportante que dadas las condiciones de infraestructura y propias del suelo en el casco urbano (superficie en materiales cementantes-impermeables-roca) no permite que las masas de agua remanentes en eventos de precipitación puedan generar procesos de recarga de acuíferos, y lo que es peor que todo el volumen de escorrentía termine en el mar sin poder ser aprovechado.

La investigación enfoca el propósito, en disminuir la brecha entre demanda y oferta hídrica en una porción del área problema, utilizando una relación sencilla de cobertura porcentual/temporal específica, donde con el diseño, construcción y operación de Unidades Hidráulicas de regulación piloto, se logre aprovechar al máximo los volúmenes remanentes posteriores a las bocatomas de captación y aquellos generados en eventos de precipitación pluvial, entregándolos posteriormente de forma equilibrada.

La necesidad de dar solución a este problema por medio de un método sencillo de aplicación a la dinámica de fluidos, radica en que si se sigue aumentando el nivel de entropía del sistema hídrico en la zona de estudio y dadas las condiciones actuales de cambio climático, la ciudad de Santa Marta, se enfrenta a aumentos significativos del IVDH, lo cual deriva finalmente en problemas serios de saneamiento básico y subdesarrollo , toda vez que el uso del agua actualmente presenta una diferencia porcentual muy alta sobre la oferta superficial asociada a la parte baja de esta cuenca hidrográfica en sus últimos siete kilómetros de su cauce de escurrimiento principal.

Es claro que, con la capacidad técnica, económica y cultural, es posible regular (como proceso netamente antrópico) el recurso hídrico desde unidades hidráulicas simples que permitan captar y aprovechar las masas que actualmente por la condición exorreica se pierden en la bahía de Santa Marta. Por tanto, la demanda neta entrará gracias a un eficaz balance de materia, en un estado más cercano al equilibrio, donde la primera variable en arrojar cambios positivos será muy seguramente el Índice del Uso de Agua (IUA), gracias al aumento de más del 80% en la capacidad de retención hídrica del área estudiada.

Formulación del problema.

Las condiciones actuales de desequilibrio en los regímenes hídricos en la ciudad de Santa Marta, sumado a elevados índices de uso de agua que en ocasiones superan el 200% en época seca (DNP, 2017), deriva en Índices de Vulnerabilidad al Desabastecimiento Hídrico con clasificaciones de “alta” a “muy alta” en época de sequía específicamente, de acuerdo a las matrices de relación presentadas por el Ideam. (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [IDEAM], 2014).

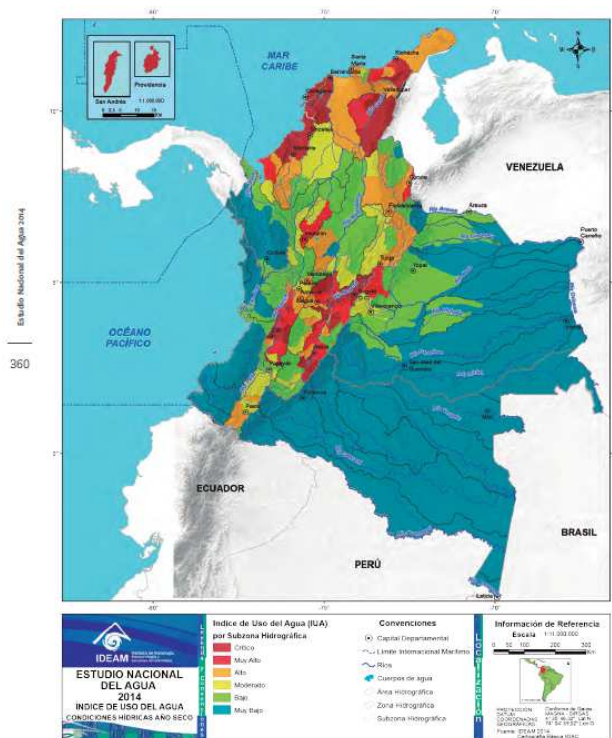


Figura 1. Índice de uso de agua para condiciones de año seco en Colombia Santa Marta. Ideam (2014).

Las condiciones anteriores respecto a los indicios, son complementadas por las pérdidas de volúmenes de agua que presenta el sistema por su condición exorreica / efímera en los últimos siete kilómetros longitudinales de la cuenca baja del río Manzanares, donde son “desperdiciados” grandes volúmenes de agua en la dilución en medio salino por vertimiento final sobre la bahía de Santa Marta. El problema se identifica como el desabastecimiento hídrico en la ciudad de Santa Marta, a partir de la incapacidad (de varios sectores) de regular las masas de agua aportadas por áreas de condición exorreica-efímera. A su vez el problema tiene su punto de partida en las condiciones físicas del medio estudiado, donde variables como la precipitación, infiltración, escorrentía, así como elementos de infraestructura como drenajes y captaciones, hacen que el aprovechamiento de estos volúmenes de agua sea totalmente inviable. Dentro de la descripción que podría generarse de ese problema se tiene entonces el desequilibrio entre oferta y demanda

por la pérdida de agua generada en precipitaciones atípicas, en zonas de características hidráulicas desfavorables y en ausencia de elementos de ingeniería, que pudieran potencializar el aprovechamiento de estos volúmenes hasta ahora perdidos a la bahía de Santa Marta.

Técnicamente luego de una precipitación aquellas áreas aportantes o microcuencas (Nivel 3) son incapaces de incorporar los remanentes de agua generados y expresados en escorrentía superficial, sobre cauces o fuentes hídricas que permitan abastecer a la zona y con esto disminuir la dependencia de consumo sobre el sistema público de acueducto de la ciudad.

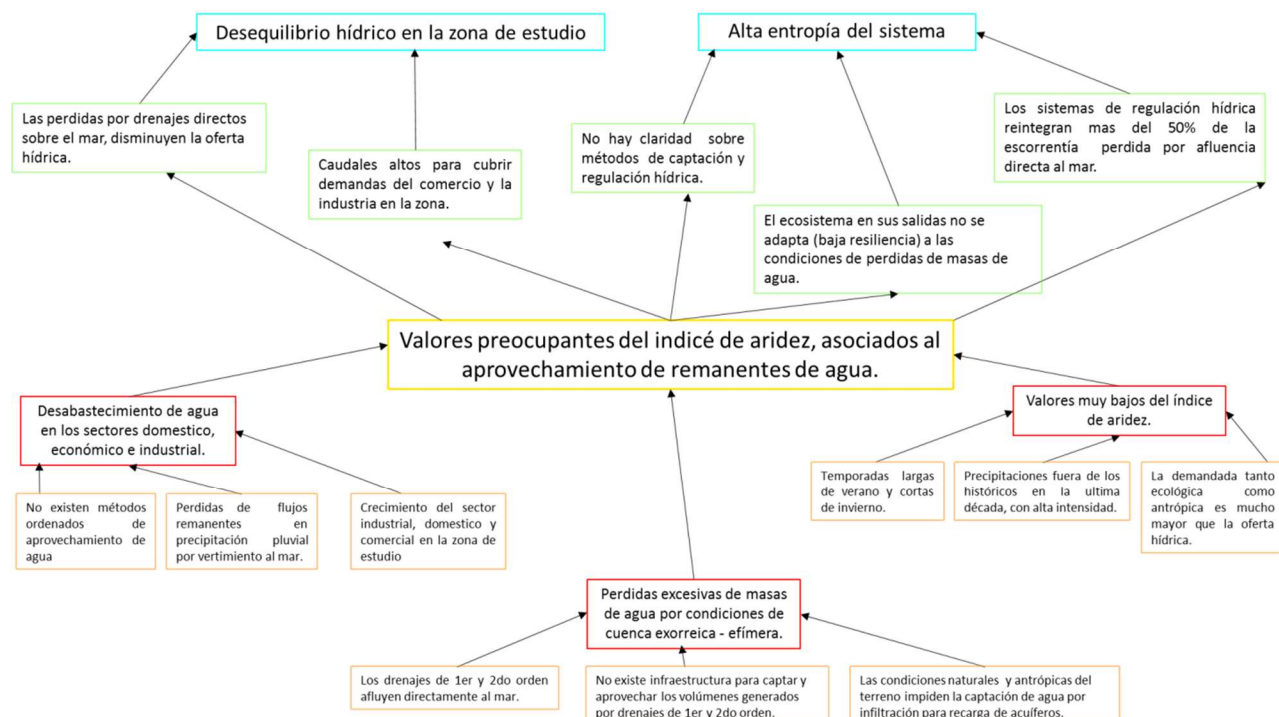


Figura 2. Árbol del problema (causa-efecto) para el caso de estudio. Propia (2018)

Esta incapacidad de regulación sobre los remanentes de precipitaciones por escorrentía superficial y la retención hídrica en ciertas áreas aportantes, dadas las condiciones naturales (Geomorfología – geografía respecto al Ecuador), así como de la errada ubicación de algunas bocatomas en la ciudad, crearan un efecto progresivo sobre el problema de desabastecimiento,

toda vez que millones de litros de agua seguirán siendo vertidos (naturalmente) al mar sin que puedan ser aprovechados para suplir necesidades fundamentales de saneamiento básico, donde paralelamente el Índice de Uso del Agua seguirá creciendo acorde a las tasas de crecimiento de las comunidades estudiadas, con el agravante de sequías más prolongadas y épocas de lluvia con mayor intensidad de precipitación pero sostenidas por periodos mucho más cortos de tiempo. De no generarse estrategias innovadoras y poco convencionales (como la que plantea el presente estudio), la población influenciada por los 24 Km² de área aportante en los últimos siete kilómetros del río Manzanares, sin duda sufrirá problemas graves en términos de saneamiento básico ambiental asociados directamente al agua.

Es entonces en la actual incapacidad de aprovechamiento donde se ubica la problemática que se quiere abarcar a fin de estudiar su comportamiento, generar conclusiones y aplicaciones que permitan disminuir los índices desabastecimiento que se presentan actualmente en esta ciudad costera.

Bajo una valoración preliminar con el trazado de 24Km² de área que potencialmente podría generar remanentes utilizables en la ciudad, el problema se enmarca en todas aquellas superficies que actualmente dirigen su esorrentía directamente al mar en esos últimos siete kilómetros del cauce principal del río manzanares, esorrentía que actualmente no puede ser captada por elementos naturales (acuíferos-depósitos-cauces) o antrópicos (bocatomas-embalses), para establecer principios de regulación mediante caudales utilizables, toda vez que la última captación de agua se encuentra aproximadamente a 6,20km en línea recta desde la Planta de Tratamiento de Agua Potable de Mamatoco hasta el mar, donde precisamente se enmarca el área aportante desaprovechada de 24Km². Ver Figura 4.



Figura 3. Comportamiento exorreico de los cauces y cuencas que abastecen a Santa Marta. DNP (2017)

Delimitación del problema

La cuenca del río Manzanares, ubicada sobre la vertiente noreste de la sierra nevada de Santa Marta en las coordenadas 11° 08'N, 74° 13'W y 11° 16'N, 74° 02'W. El origen del Río Manzanares se da en la unión entre las quebradas Onaca y Girocasaca, cuenta a su vez con una diferencia total de alturas de hasta 2300msnm, donde la zona más alta se enmarca hacia el oriente de la cuenca.

La zona seleccionada para el análisis y estudio del problema corresponde a la microcuenca Santa Marta, área aportante al río Manzanares y que hace parte de la cuenca baja en sus últimos siete kilómetros. Con un área de drenaje aproximada de 24 km² y un perímetro total de 32km, esta “microcuenca” influye significativamente sobre todos los índices relacionados con el recurso

hídrico, así como en proporciones diferentes sobre los demás índices de evaluación y diagnóstico.

Debido a factores como la población, el comercio y la industria, la ciudad de Santa Marta genera una presión alta sobre la variable específica de cantidad de agua sobre el cauce del río Manzanares. Lo anterior se debe a que además del consumo y generación de ARD por procesos vitales, se suman aquellas actividades antrópicas asociadas al desarrollo de la ciudad precisamente desde el componente industrial. Para efectos prácticos donde se potencialice la eficacia de la experimentación, los análisis y las variables de respuesta, con recursos austeros en tiempo, personal y dinero, se ubica un área de aplicación de la investigación para demostrar la factibilidad de la instalación de unidades hidráulicas como reguladoras del flujo hídrico, que aportaran a la solución del problema. El área escogida se enmarca dentro de 0,042Km² de superficie, área que corresponde al 0,17% del área total de referencia. La línea que enmarca el proyecto se traza por los cerros de Punta Betín y Ancón, adyacentes al Puerto de Santa Marta dentro del macizo occidental de la Sierra Nevada de Santa Marta. (Ver Figura 5).

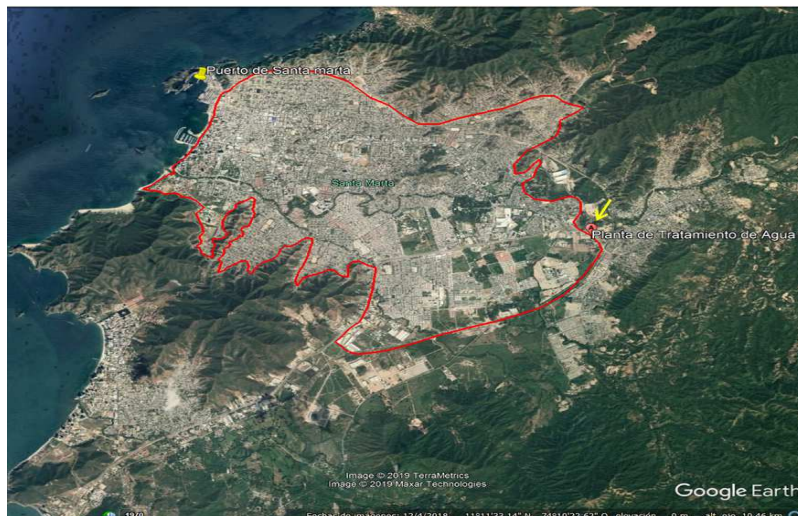


Figura 4. Área aportante sin aprovechamiento, cuenca baja del río Manzanares. Google Earth (2018)



Figura 5. Área de referencia colinas Ancón y punta Betín; Puerto de Santa Marta. Google Earth (2019)

Se seleccionó un área de estudio sobre las estribaciones de los cerros de Punta Betin, en el interior del Puerto de Santa Marta. El área de donde se extraerán muestras representativas y algunas variables de interés para la investigación, presentan características homologables de los 0,042Km² establecidos como área de referencia y proyección de resultados (ver Figura 5). El área escogida presenta un clima seco, suelos con baja capacidad de percolación, pendientes pronunciadas, altas temperaturas (hasta 40°C), evaporación considerable y la característica más importante, cauces de escurrimiento principal exorreico. (Datos obtenidos por el Autor como información primaria en campo).

Identificación del problema.

El problema podría tener una influencia indirecta en la desestabilización del *índice de vulnerabilidad por desabastecimiento hídrico (IVDH)*, por periodos específicos de tiempo dentro del entorno social de la comunidad del barrio San Martin próximo a la terminal portuaria y por ende al área de estudio. De acuerdo con lo anterior el problema radica en la inestabilidad entre la oferta y la demanda de agua para esta zona de la ciudad, toda vez que El Índice de Uso del Agua

IUA para Santa Marta en el año 2017 arroja un valor de 213% (DNP, 2017), lo anterior sumado a un Índice de Retención Hídrica cercano a cero dadas las pobres condiciones de infiltración en los últimos siete kilómetros de la cuenca baja del río Manzanares, lo que conlleva finalmente a una situación generalizada por un IVDH alto.

El problema se puede representar cuantitativamente con las siguientes proyecciones:

- Precipitación media de acuerdo con datos suministrados por Corpamag en la estación universidad del Magdalena años 2017 y 2018:
 - P: 584,1mm/año. (Días lluvia: 61 --- Horas lluvia: 175).
- Intensidad de acuerdo al promedio aritmético de los datos suministrados por Corpamag (serie de 15.302 datos. Corpamag, 2019):
 - I: 63,3mm/h (para P: 12,1mm).
- Demanda máxima horaria calculada como el consumo doméstico e industrial del área de influencia y las actividades en área de estudio. (Fuente propia, 2019):
 - Dh: 10.540 L/h.
 - Domestico: 225.000 L/día (Basado en 2.500 personas (brr san Martin) y 90 l/p.dia)
 - Industrial: 28.000 L/día (Para el control ambiental en 0,60 hectareas del terminal portuario).
- Oferta del sistema Planta de tratamiento de agua de Mamatoco como referencia de datos para época de sequía. (DNP, 2017):
 - Oferta hídrica: 80 L/s. ($6.912\text{m}^3/\text{día}$).

- Cobertura sistema de acueducto considerando solo uso doméstico y calcula según caudal superficial en época de sequía de 80L/S. (DNP, 2017) y una población de 484.000 habitantes:
 - Cobertura: 14,3 L/hab.día
 - Caudal máximo horario demanda barrio San Martin: 2,60 L/s
- Escorrentía calculada con base a precipitación media de la ciudad de Santa Marta para los años 2017 – 2018, para la estación Universidad del Magdalena, así como un área aportante de 320m²:
 - Escorrentía: 3,90 L/s. (14.404 lts/h, para D=60min, asumiendo caudal punta)
- Proyección de volumen perdido hacia el mar: 14.040lts (sin unidades de regulación)
- Capacidad del acueducto para cubrir demanda doméstica: 16%.
- Déficit del sistema de acueducto: **84% (Para época seca y solo uso doméstico)**
- Capacidad del sistema con Unidades hidráulicas de regulación para cubrir el déficit de 75,7 L/hab.día: **100% durante 1,8 horas.** (Para I=63,3mm/h ; A=320m² ; D=60min)

Para precipitaciones medias de 12,2mm/día, se dejan de aprovechar 12,1 litros por cada metro cuadrado de área aportante, al no contar con Unidades Hidráulicas de Regulación, lo que indica que para las 4,2 hectáreas (0,042Km²) que forman el área aportante en los cerros de punta Betín al interior del terminal Portuario, las Unidades Hidráulicas de Regulación, podrían captar y aprovechar 0,51 millones de litros de agua en una precipitación de una hora, logrando cubrir la demanda del barrio San Martin al 100% durante 2,3 días y/o la demanda industrial al 100% durante 18días, regulando el flujo a un gasto máximo de 175 L/min.

En este caso y para una intensidad I=63,3mm/h, las Unidades Hidráulicas de Regulación, deberán tener una capacidad de almacenamiento mayor o igual a 517m³

Pregunta de investigación.

¿La instalación de Unidades Hidráulicas de Regulación sobre los cerros de Punta Betín, en la cuenca baja del río Manzanares, podría aportar a la disminución del Índice de Vulnerabilidad por Desabastecimiento Hídrico en la comunidad del barrio San Martín como área de influencia directa del terminal Portuario de Santa Marta?

Preguntas directrices del problema.

¿Qué porcentaje sobre el desabastecimiento hídrico, aportan las pérdidas por escorrentía directa al mar en la zona adyacente al Puerto de Santa Marta?

¿Cuál es la tasa de retención hidráulica efectiva para la captación de la escorrentía superficial por parte de las unidades de regulación en los cerros de Punta Betín, en Santa Marta -Colombia?

¿Cuánta es la cobertura de las unidades de regulación hidráulica en términos de porcentaje y tiempo, en referencia a las demandas consideradas a partir del uso doméstico con la población asentada en el barrio San Martín?

Objetivos

Objetivo general:

Evaluar la factibilidad técnica para la instalación de unidades hidráulicas de regulación, sobre los últimos siete kilómetros de cauce exorreico en la cuenca baja del río Manzanares, en Santa Marta; Colombia, durante el periodo 2018 - 2019.

Objetivos específicos:

*Calcular que porcentaje de la escorrentía superficial, podrían captar las unidades hidráulicas de regulación, ubicadas en un drenaje de primer orden para un área aportante de 320m^2 , ubicada en los cerros de Punta Betín; en Santa Marta, Colombia.

*Calcular la tasa de retención de escorrentía en los cerros de Punta Betin, de acuerdo a la medición de la tasa de regulación hídrica efectiva en litros por metro cuadrado por minuto ($\text{L}/\text{m}^2.\text{min}$), mediante ensayos controlados desde un prototipo de cuenca exorreica a escala 1:50.

*Medir la cobertura en abastecimiento hídrico en porcentaje y tiempos sobre las demandas críticas por uso doméstico de agua en el barrio San Martin, en el sector noroccidental de Santa Marta; Colombia, en el periodo 2018 - 2019.

Marco Teórico

Marco Referencial.

Diagnóstico Ambiental:

El área de estudio se encuentra localizada específicamente sobre los cerros noroccidentales de la ciudad de Santa Marta, específicamente en la Sociedad Portuaria de Santa Marta.

Corresponde a colinas con altitudes entre 40 y 75 msnm, con pendientes que alcanzan hasta el 40% en la ladera adyacente al mar. Mientras que la capa de suelo sobre la roca es muy superficial, alcanzando solo 10 cm, mientras que la vegetación presente está catalogada como Bosque seco tropical bs-t. (Rangel, 2018). De acuerdo a información primaria obtenida en campo para este estudio, el área de drenaje presenta una condición exorreica “efímera” determinada por los niveles de drenaje, los cuales se dan toda vez que el área aportante una vez

generada la escorrentía por precipitación, escurre por drenajes de máximo hasta 2do orden, para finalmente afluir a un canal principal (artificial) y desembocar en el mar, con tiempos que no alcanzan los 60 minutos.

Las demandas actuales de los asentamientos en la porción de cuenca estudiada, son bastante altas respecto a la oferta natural (sin incluir abastecimiento por acueducto), razón por la cual los índices de vulnerabilidad al desabastecimiento hídrico calculados, arrojan valores de “muy alto” aun cuando en fenómenos de precipitación pico (I: 80mm/h) se pueden generar caudales de hasta 600 L/s, que no alcanzan a suplir las necesidades toda vez que (valor aproximado)casi el 70% se “perderá” por afluencia directa al mar. Por características generales asociadas al área de estudio, como tipo de suelo, pendientes, capacidad de retención hídrica y vegetación, se presenta como un territorio vulnerable al desequilibrio en términos de balance hídrico.

A lo anterior se suman los caudales demandados por la actividad domestica e industrial, razón por la cual se convierte de inmediato en objeto de estudio debido a la fuerte influencia que tienen los aspectos antes mencionados, con los altos índices de vulnerabilidad al desabastecimiento hídrico y los problemas de saneamiento básico ambiental derivado de esta condición.

Localización general:

La cuenca del río Manzanares se localiza sobre la vertiente Noreste de la Sierra Nevada de Santa Marta, correspondiendo a las coordenadas 11° 08'N / 74° 13'W y 11° 16'N / 74° 02'W. la cuenca en si se origina a partir de la unión de las quebradas Onaca y Girocasaca. (Babilonia y García, 2012). Según el trazado inicial y como se explicó en párrafos anteriores, la zona de estudio no se considera aportante sobre el cauce de este río (el Manzanares) razón por la cual se generó la correspondiente explicación. En la Figura 8 se evidencia el trazado de tres (3) de las más

importantes cuencas del Magdalena y se observan los drenajes de 1er y 2do orden donde claramente presentan una condición exorreica-efímera.

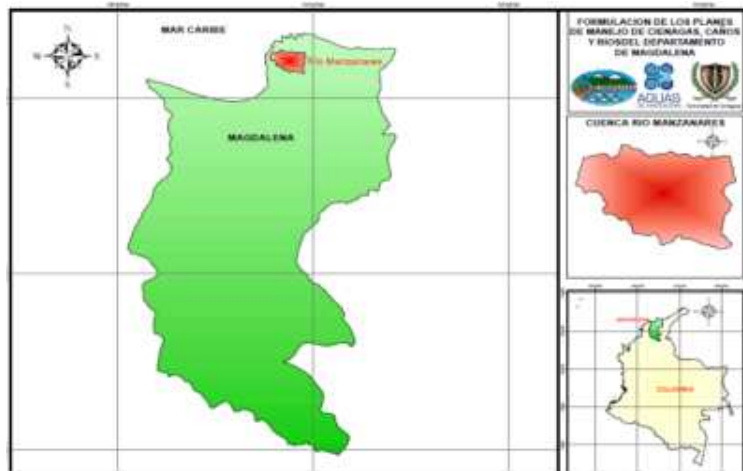


Figura 6. Ubicación de la cuenca dentro del departamento de Magdalena. Babilonia y García (2012).



Figura 7. Delimitación (divisoria de aguas) y drenajes cuenca río Manzanares. Babilonia y García (2012).

Localización área de estudio:

El área de estudio ($0,042\text{Km}^2$), se encuentra ubicada hacia el norte de la Costa Caribe Colombiana, sobre el costado noroccidental del macizo de la Sierra Nevada de Santa Marta; correspondiendo a las coordenadas geográficas $74^\circ 13'$ de longitud oeste y $11^\circ 15'$ de latitud norte. Limitando al Norte con los cerros de San Martín; al Sur con la bahía de Santa Marta, al este con la ciudad de Santa Marta y al occidente con el cerro Ancón y la ensenada de Taganguilla. (García Francisco, et al., 2005).

La bahía de Santa Marta se localiza al nor-occidente de la ciudad y justamente el área de estudio encierra los cerros que ocupan la parte más al Norte de dicha bahía.

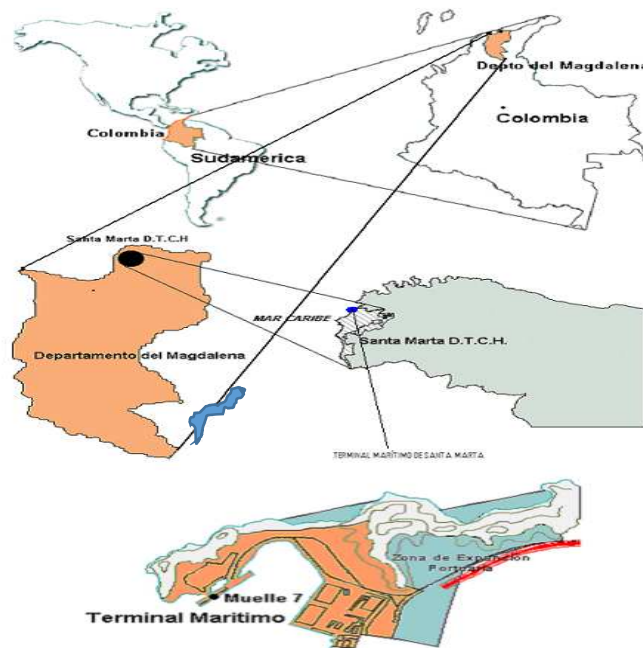


Figura 8. Localización geográfica de la zona de estudio. García Francisco, et al. (2005).

El área de estudio corresponde a un entorno natural bastante heterogéneo, donde interactúan ecosistemas terrestres y marinos en áreas bastante reducidas. El mar se encuentra a menos de 300mts de la microcuenca de referencia, condición bastante desfavorable para el aprovechamiento de masas de agua en eventos de precipitación pluvial, ya que en tiempos de descarga <60 minutos, es muy poco lo que se puede retener por medios naturales.

Uso del suelo.

El modelo territorial adoptado en el plan de ordenamiento, reconoce a Santa Marta como un escenario de cuatro vocaciones, y que para los efectos de la implementación del Plan de Ordenamiento Territorial se definen como: La Ciudad Patrimonial, Ciudad Ambiental, Ciudad Turística y Ciudad Portuaria. A continuación, se presenta lo establecido en el Artículo 58 del POT de acuerdo a las referencias consignadas en el Plan de Manejo Ambiental de Carbosan. (García Francisco, et al., 2005): “ARTICULO 58° La Ciudad Portuaria. La actividad portuaria evidencia otra de las grandes potencialidades que tiene la ciudad, se fundamenta en la explotación de una ventaja comparativa natural, el calado y profundidad, que la privilegian ante otras ciudades puertos del país”

Como se observa en el uso actual del suelo, no se mencionan aspectos de conservación sobre el recurso hídrico, sumado a que dentro de los conceptos de zonificación los cerros como área aportante, cuentan con clasificación de área protegida, razón que invita a realizar trámites de forma legal previo a cualquier intervención a gran escala en referencia con las unidades de regulación hídrica.

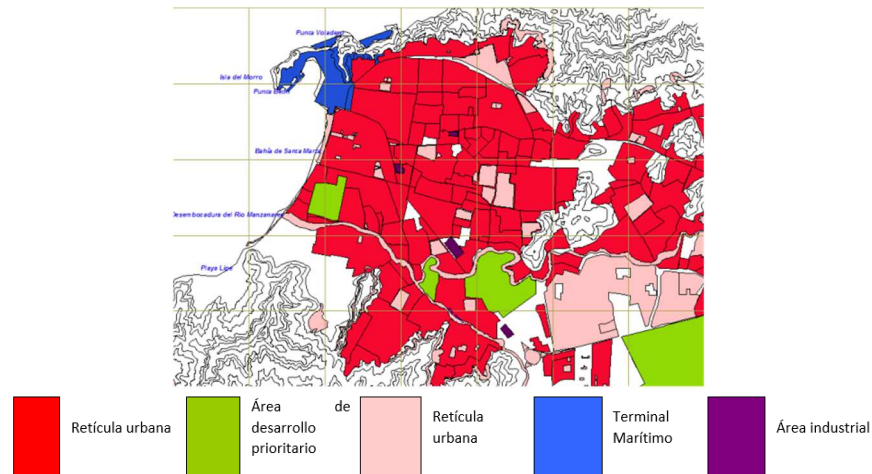


Figura 9. Usos del suelo asociados al área de estudio. García Francisco, et al. (2005).

Marco Conceptual.

Cuenca Hidrográfica: Área de aguas superficiales o subterráneas que vierten a una red hidrográfica *natural* con uno o varios cauces *naturales* de caudal continuo o *intermitente*, los cuales *confluyen* a un cauce mayor que a su vez puede desembocar en un río principal, un embalse, pantano o directamente en el mar. (Decreto. 1640 de 2012).

Para efectos prácticos las cuencas hidrográficas se dividen en subcuenca como unidad de menor jerarquía, las cuales tienen la particularidad de ser drenadas por un tributario del río principal, a su vez las microcuencas aparecen como unidad hidrográfica más pequeña dentro de una cuenca principal. Estas subdivisiones permiten lograr priorizaciones más representativas de intervención para cada zona de estudio. (Buitrago Aguirre, et al., 2014)

Así mismo en cada cuenca (sin importar el nivel) siempre se deben diferenciar tres (3) partes específicas: Alta – Media – Baja, donde respectivamente se generan procesos de erosión, transporte de materiales y sedimentación. La parte baja de la cuenca se caracteriza siempre por presentar la menor altitud (sobre el nivel medio del mar), en su mayoría tierras planas, razón por la cual se presenta la mayor concentración poblacional.

La clasificación y configuración permiten que existan procesos dentro de las Cuencas Hidrográficas, regidos por interacciones e interrelaciones representadas por funciones cíclicas y continuas o en otras ocasiones, eventuales y aleatorias, con coberturas desde grandes áreas, hasta niveles de microcuenca.

Estos procesos siguen en ocasiones principios mecanicistas donde el desarrollo está representado por un solo elemento que realiza funciones específicas con una “sumatoria” de procesos homogéneos; de la misma manera se evidencian procesos que experimentan o se fundamentan en la integralidad (sistémicos) con una combinación compleja de elementos y funciones que buscan en la gran mayoría de los casos como fin común (Salidas) los servicios ecosistémicos. En esta integralidad aparecen los componentes o sistemas constitutivos de la cuenca, segregándose (de acuerdo a sus características) en Biótico, Abiótico y Antrópica, como elementos esenciales de las cuencas es posible desprender grupos de a niveles más específicos.

Entre los procesos más comunes se encuentran:

- Geodinámicos.
- *Hidrológicos.*
- Biológicos.
- Antrópicos.



Figura 10. Cuenca hidrográfica desde un enfoque sistémico. Minambiente (2014).

Sumado es esto la Cuenca desde su “interior” presenta características fisiométricas, asociadas con la forma, el relieve, las redes de drenaje, la cobertura vegetal, así como las características geológicas de la zona. Estas funciones específicas son las encargadas de generar tipologías dentro del territorio, las cuales y a gran escala parecerían ser bastante homogéneas.

Dentro de las características fisiométricas más importantes se encuentran: (Lux, 2016)

- *Área de drenaje*: Relaciona la superficie de una cuenca contenida dentro del perímetro que construye la divisoria de aguas. (A:km²)
- *Perímetro*: Línea exterior trazada sobre la divisoria de aguas. (P:km)
- *Longitud del cauce*: Trayectoria lineal del curso principal. (L:km)
- *Longitud Axial*: Trazado en línea recta desde el punto más distante de la divisoria de aguas y hasta la desembocadura de un drenaje principal. (Lax: km)

- *Longitud total de corrientes*: Relaciona la sumatoria total de los drenajes de la cuenca. (LT: km)
- *Pendiente Media*: Variable de suma importancia en el estudio de los regímenes de escorrentía dentro de una cuenca, con influencia sobre la velocidad de drenaje y sobre el tiempo de concentración. Uno de los métodos más comunes de determinación es el método de muestra estadística de cuadrículas. (S:m/m)

En cuanto a la morfometría de la cuenca, se considera esta como el estudio cualitativo de las formas (geometría) dentro de un territorio específico. (Lux, 2016)

- *Ancho Promedio*: Relación entre el área y la longitud axial de la cuenca. (B:ad)
- *Factor de forma*: Relación entre el ancho medio y la longitud axial.
- *Factor de compacidad*: Relación entre el perímetro y la longitud de una circunferencia de área igual a la de la cuenca de estudio.
- *Densidad de drenaje*: Relación entre la longitud total de todos los drenajes identificados en la cuenca y el área tota.

Los conceptos fisiométricos y de morfometría, fueron presentados de acuerdo a “Conceptos básicos de morfometría de cuencas hidrográficas” (Benjamín Lux Cardona. Universidad de Guatemala.)

- *Hidrología*: Dingman (1994) citado por Breña y Jacobo (2006, p.11), menciona que “ la Hidrología es la ciencia que se enfoca al ciclo hidrológico global y a los procesos involucrados en la parte continental de dicho ciclo, es decir, es la geociencia que describe y predice, las variaciones espaciales y temporales del agua en las etapas, terrestre, oceánica y atmosférica del sistema hídrico global, incluyendo también los procesos químicos, físicos y biológicos, que tengan lugar a lo largo de su trayectoria”.

Partiendo de esta definición podemos visualizar el gran espectro que abarca la hidrología, razón por la cual es de suma importancia monitorear cada uno de sus indicadores a fin de entender el comportamiento y distribución de las masas de agua dentro de un área, tiempo y ecosistema determinado, así como los servicios potenciales o restrictivos que esta pueda aportar al entorno. Lo anterior siempre determinado fundamentalmente por los datos temporales y espaciales que el estudio de esta (hidrometría) puedan entregar para cada análisis particular.

- *Índice de Aridez:* Índice de aridez o índice hídrico, determinado como una característica cuantitativa del clima, que permite medir el grado de suficiencia o insuficiencia de la precipitación para el sostenimiento de ecosistemas dentro de una región o área determinada. Este índice identifica a su vez áreas deficitarias o de excedentes de agua calculadas a partir del balance hídrico-superficial. Para el caso de estudio se calcula el IA-IH según la relación entre la evapotranspiración real y la precipitación a fin de determinar un valor para el análisis. Esto toda vez que los cálculos derivados del aporte sobre este indicador del componente biótico (demanda de agua) ameritan un estudio más juicioso con lo que el índice de aridez sería mucho más representativo. (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [Ideam], 2010)
- *Índice de Escasez:* Definido como la relación porcentual entre la demanda de agua del conjunto de actividades antrópicas, industriales y comerciales, con la oferta disponible luego de aplicar factores de reducción por calidad y descontar el caudal ecológico. El dato arrojado determinara si en índice es alto, medio o bajo, en base a los diferentes usos destinados para el recurso y valorado en términos de cantidad, teniendo en cuenta la

cobertura vegetal como variable condicionante de las tasas de evapotranspiración, repercutiendo en la oferta hídrica y derivando en la disminución de la captación del recurso y en sobredemandas. La determinación de la oferta neta de la cuenca se realiza bajo la Metodología descrita en la Resolución 865 de 2004, al igual que el cálculo de la demanda neta por actividades domésticas, industriales y económicas. (Ideam, 2010)

- *Índice de Uso del Agua:* Cantidad de agua utilizada por los diferentes sectores usuarios, en un período determinado (anual, mensual) y unidad espacial de análisis (área, zona, subzona, etc.) en relación con la oferta hídrica superficial disponible para las mismas unidades de tiempo y espaciales. En sentido estricto el indicador debería considerar la oferta hídrica superficial y subterránea en forma unitaria. (Ideam, 2010). Este indicador es el reflejo del balance de materia que se da en el sistema integrado (cuenca hidrográfica) con entrada y salida representadas principalmente por el recurso hídrico. En ese orden de ideas este índice permite establecer el déficit o suficiencia de la cuenca respecto a la oferta neta de escurrimiento producida en el marco de un territorio definido.
- *Índice de Retención Hídrica:* Este índice mide la capacidad de retención de humedad de las cuencas con base en la distribución de las series de frecuencias acumuladas de los caudales diarios. Este índice se mueve en el rango entre 0 y 1, y los valores más bajos son los que se interpretan como de menor regulación. (Ideam, 2010). Para efectos de esta investigación la retención hídrica será calculada a partir del volumen que logren captar las unidades hidráulicas de regulación, respecto a condiciones específicas de

precipitación, espacio y tiempo. Con el propósito de eliminar factores de ruido en los resultados de capacidad de retención, se resta del volumen total de entrada la saturación del suelo. Así entonces, para este estudio en particular, el autor define la capacidad de retención del sistema como: $CRH = \left(\frac{Vol\ retenido}{Vol\ entrada - Vol\ saturacion} \right) \times 100$

- *Índice de Vulnerabilidad al desabastecimiento Hídrico*: Grado de fragilidad del sistema hídrico para mantener una oferta para el abastecimiento de agua, que ante amenazas – como periodos largos de estiaje o eventos como el Fenómeno cálido del Pacífico (El Niño)– podría generar riesgos de desabastecimiento. (Ideam, 2010).

Marco legal.

El ordenamiento de cuencas hidrográficas en Colombia, así como los procesos potenciales de desarrollo dentro de estos territorios, deberán enmarcarse dentro de una serie de lineamientos que permitan generar espacios de interacción y sostenibilidad, ofreciendo alternativas viables desde un enfoque sistémico en doble vía para las entradas y salidas de los sistemas.

Cada Norma cuenta con estudios previos en el campo técnico y científico, que permiten establecer las mejores “conductas” aplicables al desarrollo de las cuencas hidrográficas en el País. Cada uno de los Actos Administrativos que actualmente rigen el destino de estos territorios de importancia absoluta para la sustentabilidad de las comunidades y los elementos constitutivos, cuenta con bases justificables que logran blindar de cierta forma estas áreas frente a desarrollos desordenados, mecanicistas e insostenibles. A continuación, se presentan las Normas que a juicio del autor aplican para el estudio y los procesos inherentes esta investigación.

Tabla 1. Normas aplicables al presente estudio.

Norma	Alcance
Decreto 1640 de 2012	Reglamentación de los instrumentos para la Planificación, Ordenación y Manejo de las Cuencas Hidrográficas y Acuíferos.
Resolución 1907 de 2013	Expide la Guía Técnica para la formulación de los planes de ordenación y manejo de cuencas hidrográficas.
Decreto Ley 2811 de 1974	Se dicta el Código Nacional de los Recursos Naturales Renovables y de la protección del Medio Ambiente.
Decreto 1449 de 1997	Reglamentación parcial del inciso 1 del Numeral 5 del Artículo 56 de la Ley 135 de 1961 y el Decreto Ley 2811 de 1974, en relación con la conservación, protección y aprovechamiento de las aguas.
Resolución 865 de 2004	Adopción de la Metodología para el cálculo del Índice de Escasez para aguas superficiales.
Guía Técnica para la formulación de planes de ordenamiento del Recurso Hídrico de 2014.	Desarrollar los lineamientos básicos para la formulación del plan de ordenamiento del recurso hídrico en Colombia.
Resolución 0330 de 2017	Por la cual se adopta el Reglamento Técnico para el Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico – RAS y se derogan las resoluciones 1096 de 2000, 0424 de 2001, 0668 de 2003, 1459 de 2005, 1447 de 2005 y 2320 de 2009.
Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico.	La Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico (PNGIRH) establece los objetivos, estrategias, metas, indicadores y líneas de acción estratégica para el manejo del recurso hídrico en el país, en un horizonte de 12 años.
Resolución 0509 de 2013	Lineamientos para la conformación de los consejos de cuenca y su participación en las fases del plan de ordenación de cuenca.

Propia.2018

Metodología.

Enfoque Investigativo:

Esta investigación se desarrolla en razón a la explicación y la determinación de causas – efectos, de forma cuantitativa, comprobable y repetible en diversos contextos (“extrapolación”), donde a partir de variables de causa es posible verificar la factibilidad de instalación de Unidades Hidráulicas de Regulación, como mejoradoras de los índices hídricos.

Además, considera (la investigación) uno de los elementos constitutivos de la cuenca, así como las interacciones e interrelaciones entre los demás elementos, como generadores o receptores de efectos derivados tanto del problema como de la posible solución, representada en las unidades de regulación hidráulica.

Esta metodología logra reunir los elementos clave dentro de un enfoque sistémico como son:

- Los insumos como variables de entrada.
- La estructura y funcionalidad como procesos (transferencia – transformación de materia y energía).
- Los productos o salidas como variables de respuesta.

Finalmente, el enfoque seleccionado integra todos los elementos del sistema estudiado a partir de un análisis – síntesis donde inicialmente se desagregan los componentes por variables cuantificadas, se analizan, se hacen juicios de valor y luego se adhieren nuevamente para sintetizar esa evaluación mecanicista en un análisis sistémico nuevamente. De la misma forma la experimentación desde el enfoque empírico-analítico busca la predicción y el control de los hechos con el fin de eliminar factores de ruido y poder modificar el comportamiento de las variables de estudio (variables dependientes)

Se presenta de forma detallada la matriz metodológica general donde se expone por etapas como será abordada la investigación, siempre cumpliendo con los lineamientos mínimos del método científico: Percepción – identificación- formulación de soluciones – análisis de consecuencias y demostración por hechos verificables.

Matriz metodológica general.

Tabla 2. Relación de elementos en dentro del desarrollo metodológico Propia; 2018

ETAPA	ACTIVIDAD	ACCIONES
Investigación	1. Identificación del problema. 2. Evaluación del área de estudio 3. Formulación del anteproyecto	*Análisis de la realidad actual/percepción de condiciones locales. *Análisis de información secundaria disponible. *Definición de métodos de investigación, soluciones al problema y metodología.
Planeación de la Experimentación	1. Evaluación línea base del área de estudio	*Pruebas de campo sobre elementos específicos como suelo, geomorfología. *Cálculos morfométricos de referencia. *Recopilación y análisis de información secundaria en clima, características de la zona y comportamientos temporales.
	1. Ensayos de campo para la generación de variables de respuesta 2. Probar las soluciones planteadas y sus consecuencias. 3. Generación o aplicación de aprendizaje.	*Definición de todas las variables involucradas *Relación de materiales demandados por la investigación. *Selección y adecuación de la parcela de experimentación. *Ensayos relacionados con infiltración. *Cálculo de pendientes. *Construcción de unidades hidráulicas de regulación a escala. (1:50 – 1:200) *Desarrollo de pruebas en campo: **Precipitación inducida. **Escorrentía. **Captación. **Regulación hídrica. **Balance de masas por flujos de entrada y salida
Definición de indicadores	1. Relacionar cada indicador. 1.1 Caudal de regulación por unidad hidráulica. 1.2 Tasa de regulación hídrica. 1.3 Variación temporal índice de Vulnerabilidad al Desabastecimiento Hídrico (IVDH) 2. Elegir las variables causa.	*Definir las variables que intervienen en cada indicador. *Estudio previo del contexto de cada uno de los indicadores. *Estudio detallado de las variables y su conveniencia a partir de las salidas o puntos críticos que se quieran corregir o impactar. *Selección de las variables de mayor impacto sobre la variable de respuesta.

Análisis e interpretación.	1. Análisis detallado de los resultados experimentados. 2. Interpretar resultados	*Verificación de datos que permitan evidenciar errores. *Análisis y discusión de resultados. *Factores y efectos que influyen de manera significativa. *Interpretación al detalle de los efectos significativos de cada variable de respuesta. *Elección de la condición óptima de operación del proceso.
Control de factores de ruido.	1. Bloqueo durante el experimento	*Control directo sobre los factores no controlables. *Mantener constante durante toda la fase de experimentación los factores no controlables elegidos. *Aplicación del principio de aleatorización sobre las variables ambientales de ruido que se puedan presentar.

Fuente: Propia 2018.

Contexto metodológico.

Partiendo de la base conceptual donde la metodología de la investigación se presenta como pilar fundamental y necesario dentro de un proceso de obtención de nuevos conocimientos, se propone un orden lógico con una serie de pasos que el sujeto (observador) debe seguir para encontrar el camino directo y adecuado dentro del proceso de investigación (Gómez, 2012). Donde este será siempre visto como una estrecha relación entre sujeto y objeto.

Por tanto, es necesario iniciar la estructura metodología de esta observación, fijando ese horizonte que deberá seguir la investigación, consiguiendo el planteamiento de una metodología ordenada y sistemática que logre bloquear en lo posible los factores derivados de la improvisación, interfiriendo finalmente en los resultados finales con debilidades o fallas al momento de argumentar la factibilidad de las unidades hidráulicas de regulación como estabilizadoras de oferta y demanda hídrica.

Para el desarrollo de este experimento en particular, se estructuro una metodología con base en las etapas fundamentales de una investigación de campo, donde siguiendo la estructura lógica del método científico se pretende manipular una de las variables causa con el fin de observar el comportamiento de las unidades experimentales en diferentes escenarios y finalmente analizar cómo afecta este comportamiento de la variable causa sobre la variable de respuesta.

El experimento contempla la manipulación de la precipitación mediante la **simulación del fenómeno (lluvia)**, dentro un área superficial constante en dimensiones y características físicas que no serán variadas a lo largo de los ensayos. Estos dos elementos (la precipitación y el área), serán los responsables de arrojar datos de entrada para los análisis de una de las variables causa, la cual se ha determinado para esta investigación como “el Índice de retención hídrica” para cada uno de los dos (2) escenarios de ensayo.

Los escenarios entendidos como el área de ensayos en las unidades experimentales, con modificaciones en su componente hidráulico, tendrán **variaciones en caudales de escorrentía y volúmenes aprovechados por retención hídrica**, componentes que serán explicados a lo largo del desarrollo del componente metodológico.

Es preciso aclarar que las variaciones que sufran estos parámetros dentro de los ensayos, obedecen al grado de condicionamiento que se logre obtener de los elementos que serán manipulados dentro del sistema. Para el desarrollo de los experimentos y la recopilación de información desde las unidades experimentales, se construyó un piloto a escala 1:50 del área de estudio (Cerros de Punta Betín en la cuenca baja del río Manzanares), simulando las características geomorfológicas, así como el comportamiento hidráulico a partir de principios de la mecánica de fluidos, como elementos constitutivos de este sistema en particular

Bases metodológicas de la investigación.

Forma de investigación

Aplicada, al buscar variables de respuesta o salida a partir de una confrontación entre la teoría y la realidad. Dentro de este gran universo de la investigación aplicada, se escoge para el caso particular de estudio la investigación *cuasi-experimental (inducción incompleta)*, toda vez que no se tendrá control absoluto sobre los factores de ruido identificados. (Gómez ,2012).

Tipo de investigación.

Investigación de Campo, ya que se pretende aplicar el método científico en el tratamiento de un sistema de variables y sus relaciones. Todo sustentado en experimentos y observaciones realizadas (Díaz, 2013).

Línea de la investigación.

Cuencas hidrográficas, ordenamiento y manejo de los recursos naturales con un enfoque particular sobre el uso sostenible del recurso hídrico. (Díaz, 2013).

Enfoque.

Sectorial, el estudio se enfoca en el recurso hídrico como uno de los elementos básicos de la cuenca, con el fin de optimizar su uso y/o protección. (Díaz, 2013).

Método

Inductivo, a partir de resultados particulares, se pretende encontrar relaciones generales y replicables (Gómez, 2012).

Propósito de la investigación.

Establecer el porcentaje de aprovechamiento que puedan aportar las unidades de regulación hidráulica sobre la escorrentía remanente en el área de los cerros de Punta Betín, consiguiendo el valor óptimo de la tasa de regulación hídrica, contribuyendo así con FIN de la investigación, el cual se centra en lograr la disminución, por un tiempo determinado, de la vulnerabilidad por desabastecimiento hídrico en el área de influencia directa del terminal Portuario de Santa Marta, representada por el asentamiento urbano del barrio San Martín.

Desarrollo metodológico.

Localización de la investigación.

Parámetros georreferenciales.

El proyecto de investigación se ubica geográficamente en Colombia (sur América) en la ciudad de Santa Marta (Departamento del Magdalena) y sobre su posición más Noroccidental, enmarcada al sureste por el continente y al Noroeste por el mar Caribe (Bahía de Santa Marta).

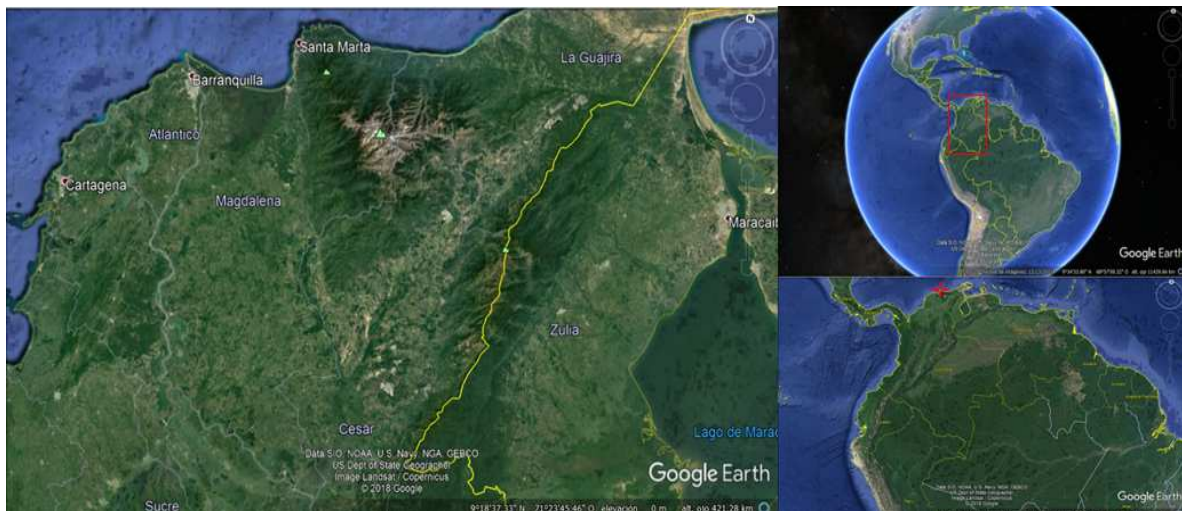


Figura 11. Ubicación geográfica general de Santa Marta. Google Earth (2015).

La ciudad de Santa Marta, se encuentra a orillas de la bahía del mismo nombre sobre el Mar Caribe, en las estribaciones de la Sierra Nevada de Santa Marta en el departamento del Magdalena. Sus coordenadas geográficas son: 74° 12' 06" W // 11° 14' 50" N. El perímetro limita por el norte y el oeste con el Mar Caribe, por el este con el departamento de La Guajira y por el sur con los municipios de Aracataca y Ciénaga. (*Alcaldía de Santa Marta, 2019*).



Figura 12. Secuencia ubicación área de estudio (Nacional – Departamental – Municipal). Google earth (2015).

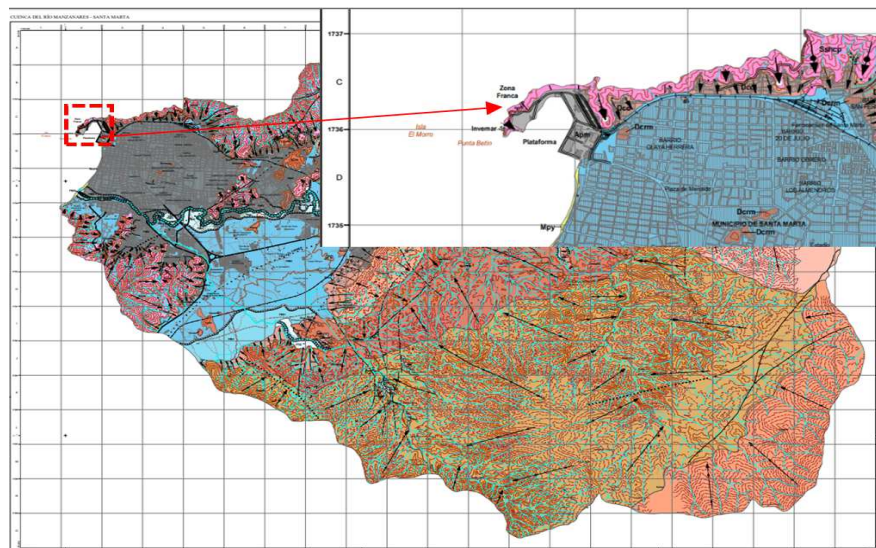


Figura 13. Cuenca del río Manzanarés – Santa Marta Colombia. Mapa geográfico de la cuenca del río Manzanarés. Javier Idarraga/Wiliam Henao (2008)

La zona donde se desarrolla el estudio, se encuentra implícita dentro del área física que forman los cerros de punta Betín, adyacentes al terminal Portuario de la ciudad de Santa Marta, haciendo parte de la cuenca baja del río Manzanares en su último kilómetro. Sin que técnicamente haga parte del área aportante o de drenajes, toda vez que esta es una de las problemáticas que impulsan esta investigación, al considerarse un área “gris” en la zona más noroccidental de la cuenca, que por su condición exorreica queda fuera de los aportantes al cauce principal. La cuenca del río Manzanares se localiza sobre la vertiente Noreste de la Sierra Nevada de Santa Marta, correspondiendo a las coordenadas $74^{\circ} 13' W // 11^{\circ} 08' N$ y $74^{\circ} 02' W // 11^{\circ} 16' N$. La cuenca se encuentra delimitada por la unión de las quebradas Onaca y Girocasaca.

La investigación será desarrollada con base en las condiciones espaciales, pedológicas, climáticas, topográficas y morfométricas de una porción de área ubicada en la cuenca baja del río Manzanares, Sobre el costado noroccidental de la ciudad de Santa Marta, dentro del entorno operativo del Puerto de Santa Marta. Según las coordenadas geográficas $74^{\circ} 13' 10,69'' W // 11^{\circ} 15' 8,5'' N$.



Figura 14. Ubicacion geografica area especifica de estudio. Puerto de Santa Marta. Google earth (2018)

Un polígono definido mediante coordenadas geográficas (ver figura 15) será el que encierre el área geográfica de estudio, desde la cual se extraerán algunos de los datos más significativos mediante el método de parcelación (cuadriculas), definiendo una muestra representativa que logre replicar las propiedades físicas del suelo en las unidades experimentales de ensayo. El polígono que para este caso representa el universo de estudio, se encuentra inscrito en el área geográfica descrita como de referencia (Cerros de Punta Betín en el Puerto de Santa Marta), con un perímetro total de 75,5mts que encierra un área superficial de 320m², siendo esta área el valor de referencia para la parcelación y el muestreo. Este polígono está conformado por las siguientes coordenadas.



*Figura 15.*Poligono de muestreo y referencia area de estudio.Google earth (2017)

Coordenadas geográficas en polígono de referencia área de estudio

- P₁P: 74° 13'11,06" W // 11° 15'8,87" N.
- P₂P: 74° 13'11,31" W // 11° 15'8,21" N.
- P₃P: 74° 13'10,82" W // 11° 15'8,46" N.
- P₄P: 74° 13'11,82" W // 11° 15'8,53 N.

Dentro de este polígono se encierra el área geográfica de referencia, en adelante Área de Estudio, donde se desarrollará el muestreo y análisis de algunas propiedades físicas de la superficie. Los factores estudiados servirán dentro del proceso de experimentación para replicar las condiciones básicas del área aportante con el fin de extraer datos que permitan llegar a un nivel de aceptación sobre la factibilidad de instalación de unidades hidráulicas como reguladoras del flujo hídrico.

Parámetros Meteorológicos.

Entiéndase la meteorología como la ciencia que estudia la atmosfera (particularmente el clima) por medio de los fenómenos y las propiedades que se desarrollan en este espacio físico. Para efectos prácticos dentro de la investigación se tendrán en cuenta tres (3) parámetros esenciales por la influencia que ejercen sobre el clima del área de estudio. Las variables de importancia sobre el estudio de comportamiento en la variable causa serán:

Temperatura: Formalmente la temperatura es una magnitud relacionada con la rapidez del movimiento de las partículas que constituyen la materia. Cuanto mayor agitación, mayor temperatura, de acuerdo a lo consignado en el documento Meteorología y climatología “Semana de la ciencia y la tecnología 2004” España.

Temperatura Ambiente o del aire: Para el caso específico de estudio lo que se pretende medir y referenciar está relacionado con esta variable en el aire ambiente en la superficie (+/- 1,50mts). Para esta medición se utilizará un termómetro y los resultados serán presentados en grados Celsius. Sumado a la medición en las parcelas de muestreo se tomará en cuenta los datos históricos obtenidos de la estación

Meteorológica universidad del Magdalena para el año 2018, suministrados por Corpamag.

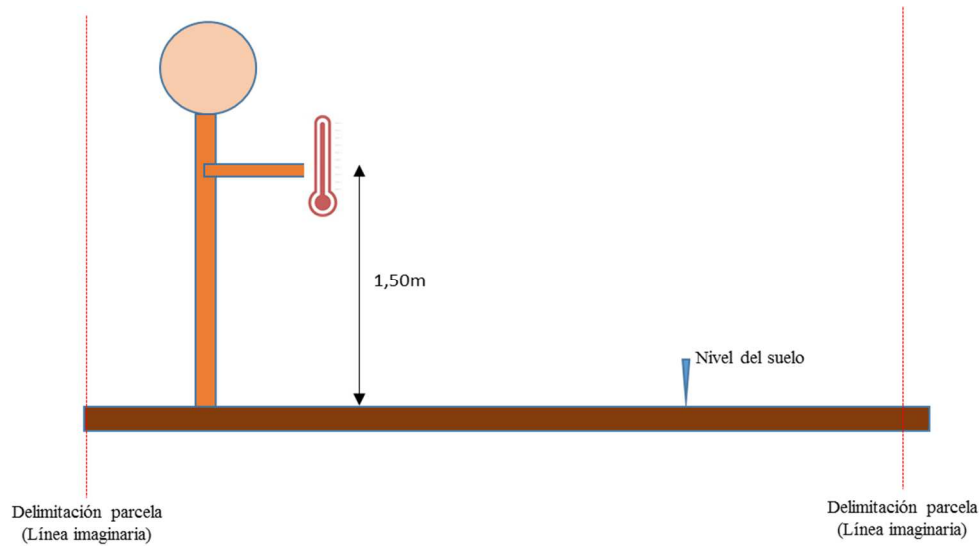


Figura 16. Esquema aplicado a la toma de temperatura del aire (T° ambiente) en parcela de estudio. Propia (2018).

Temperatura del suelo: Como parte activa del proceso de evaporación, saturación e infiltración, esta variable climática podría ser de las más importantes dentro de la investigación. Con el uso de una pistola de temperatura con medición por infrarrojo, se tomarán lecturas en puntos definidos en las parcelas de estudio, así como en el modelo de experimentación a escala 1:50. Las mediciones y los datos serán relacionados en grados Celsius.

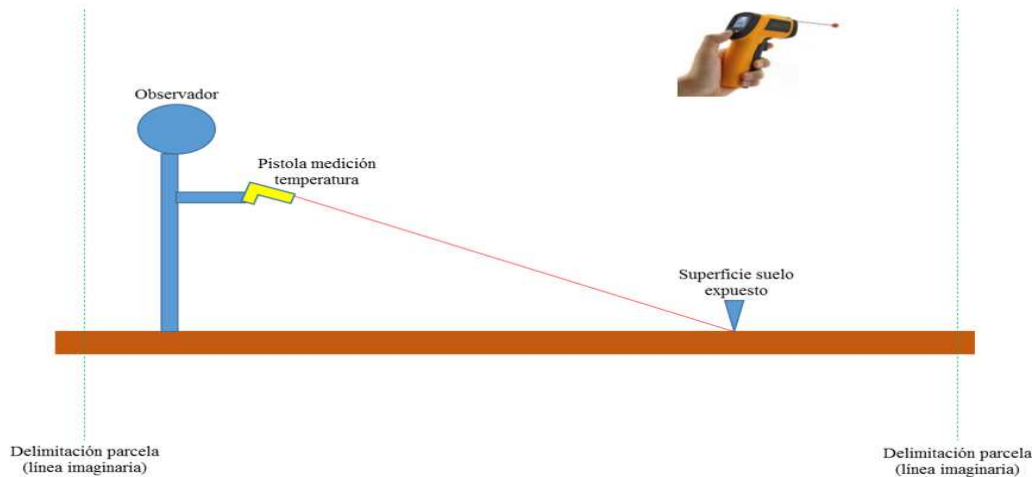


Figura 17. Esquema aplicado a la toma de temperatura del suelo parcela de estudio. Propia (2018).

Precipitación: Corresponde a cualquier agua meteórica recogida sobre la superficie terrestre. Dentro de esta clasificación se incluye básicamente: Lluvia, nieve y granizo. El estudio de las precipitaciones es fundamental dentro de cualquier evaluación que se realice sobre el componente hídrico de la escorrentía superficial, constituyendo esta (la precipitación) la principal entrada de agua de una cuenca (Sánchez, 2012). Para la valoración y estudio de la precipitación dentro de la investigación de referencia, se tomarán los datos del año inmediatamente anterior (año 2018), que permitan establecer los valores máximos, medios y mínimos para este periodo de tiempo (12 meses), sobre el comportamiento de esta variable en la cuenca baja del río manzanares en el casco urbano de la ciudad de Santa Marta. NO se realiza el análisis de una serie de datos mayor, dado que lo que se quiere demostrar es la influencia de las unidades de regulación sobre los índices de desabastecimiento, sin que sea un factor condicionante para esto la magnitud de las precipitaciones, toda vez que el proyecto se amolda a cualquier intensidad y duración. Sumado a esto se realiza una proyección sobre el valor de la precipitación que se pretende utilizar en el ensayo,

utilizando las curvas I-D-F (Intensidad, Duración, Frecuencia) de la estación meteorológica de la Universidad del Magdalena. Finalmente se amplía el conocimiento sobre esta variable con una medida de la precipitación en campo dentro de la parcela (muestra), utilizando un pluviómetro adaptado. Se tendrán en cuenta valores de información primaria de precipitación y el análisis de comportamiento sobre la información secundaria.

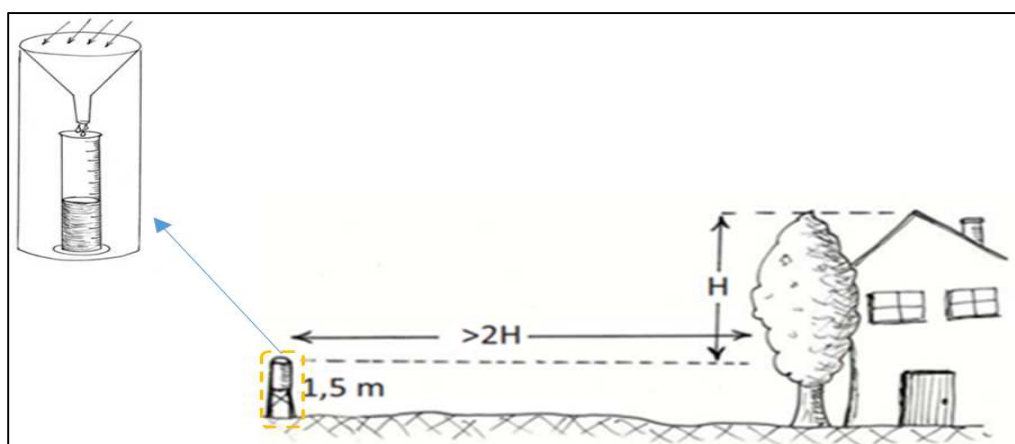


Figura 18 .Esquema de referencia para la determinacion de precipitacion en campo. Sanchez (2012)

Evaporación: Proceso físico por el cual el agua pasa de estado líquido a gaseoso retornando directamente a la atmosfera en forma de vapor. Todo el tipo de agua en la superficie terrestre está expuesta y son vulnerables a este fenómeno. Simultáneamente a este fenómeno se genera la condensación, que se entiende como el regreso de las moléculas al estado líquido. Es finalmente la diferencia entre las moléculas que abandonan la lámina de agua y las que regresan a esta, la que cuantifica el valor global de la evaporación. Para el caso de estudio la perdida de agua hacia la atmosfera y desde el cauce principal y la esorrentía superficial, solo será asociada al fenómeno de evaporación neta sin tener en cuenta la Transpiración, entendiéndose esta última

proceso físico-biológico por el cual el agua pasa de estado líquido a gaseoso a través o por efecto del metabolismo de las plantas, liberándose directamente a la atmosfera.

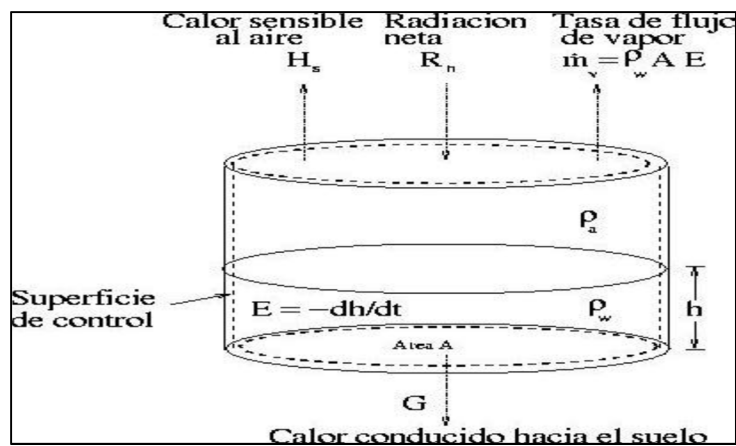


Figura 19. Modelo de evaporación a partir del balance de masas y energía. Unicen (2019)

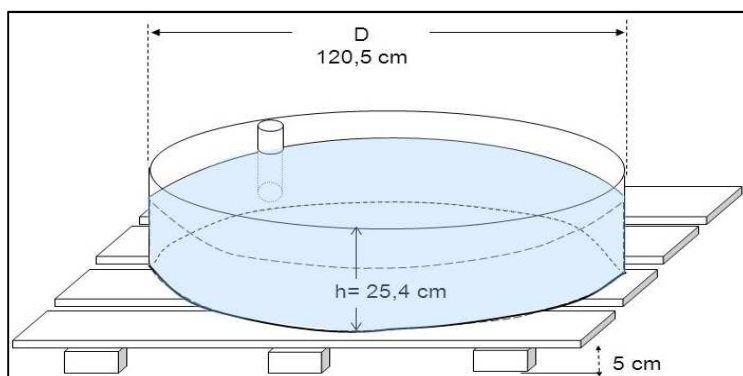


Figura 20. Tanque evaporímetro Tipo "A". Puppo (2018)

De acuerdo a las Figura 19 y Figura 20, la evaporación será calculada por balance de materia dentro de un periodo de tiempo establecido, esta valoración se realizará usando como base el modelo de evaporímetro presentado por la facultad de agronomía de la universidad de la República, Uruguay (Puppo, 2018). La medición de esta variable climática se hará en la parcela de muestreo y en las unidades de experimentación (modelo a escala 1:50) con el fin de tener datos representativos para cada escenario de investigación.

Experimentación.

Fundamentado en la necesidad de resolver un problema o comprobar una idea, el diseño experimental establece una metodología que permite determinar cuáles pruebas (ensayos) se deben realizar y de qué manera, con el fin de obtener datos que al ser analizados bajo bases estadísticas proporcionen evidencias objetivas que permitan responder a las interrogantes planteadas.

Desde la lógica funcional, el diseño de experimentos guarda una relación directa y casi que lineal con el desarrollo del método científico, el cual es considerado como la sucesión de pasos lógicos a seguir para descubrir nuevos conocimientos (Percepción – identificación – planteamiento de soluciones – deducción – validación). Este método es aplicado con el propósito de generar conocimiento a partir de la observación de un objeto, mediante el desarrollo de pruebas planeadas adecuadamente. El Experimento como base fundamental del diseño y la investigación, permite cambiar las condiciones operacionales y funcionales de un sistema (manipular), con el propósito de medir el efecto del cambio sobre las variables de respuesta.

Este proyecto de investigación fundamenta su experimentación y diseño, en la alteración del comportamiento de la escorrentía superficial (Regulación hídrica superficial) luego de un evento de precipitación pluvial tipo, que en este caso particular correspondería a los valores de precipitación e intensidad referenciados dentro del área de estudio.

Por tanto y a partir de una manipulación conocida y controlada se modificara el comportamiento de esta variable, (Oferta hídrica superficial disponible) midiendo el efecto que esta alteración generara sobre la capacidad de retención hídrica de la cuenca (modelo a escala 1:50) y como este cambio en la retención hídrica del área, puede modificar la variable de respuesta representada por el *Índice de Vulnerabilidad al Desabastecimiento Hídrico*, la cual se presume

estaría directamente (no lineal) asociada a la capacidad de retención y regulación hídrica de las cuencas.



Figura 21.Orden logico del metodo científico. Elaboracion Propia (2018)

Población: Entendida como una colección o totalidad de posibles individuos, especímenes, objetos, *áreas geográficas* o medidas de interés, sobre los que se hace un estudio. (Gutiérrez, 2012) Las Poblaciones pueden ser Infinitas (grandes), tomando en cuenta que dentro de la bibliografía consultada este término adopta un carácter subjetivo, dado que según los recursos (económico, humano, tiempo) las poblaciones pueden pasar de infinitas a finitas dependiendo del Observador, debido a que dentro de la bibliografía consultada este término adopta un carácter subjetivo, ya que según los recursos (económico, humano, tiempo) las poblaciones pueden pasar de infinitas a finitas dependiendo de cada observador. La condición anterior es la que finalmente obliga al investigador a hacer uso de una muestra representativa.

Para este caso en particular, se tomara como referencia de estudio, un área definida previamente por el polígono de referencia (ver figura 22), el cual encierra un total en superficie de 320 m². Las dimensiones del área en superficie serán estandarizadas por los lados (B:9m x L:36m). En la etapa de muestreo se especifica como el área será parcelada en cuadrículas de 9m x 4,5m; para

un total de 8 parcelas de monitoreo y así poder realizar el análisis sobre una muestra representativa.



Figura 22. Área de estudio – Cerros de punta Betin Puerto de Santa Marta. Google Earth.(2017)

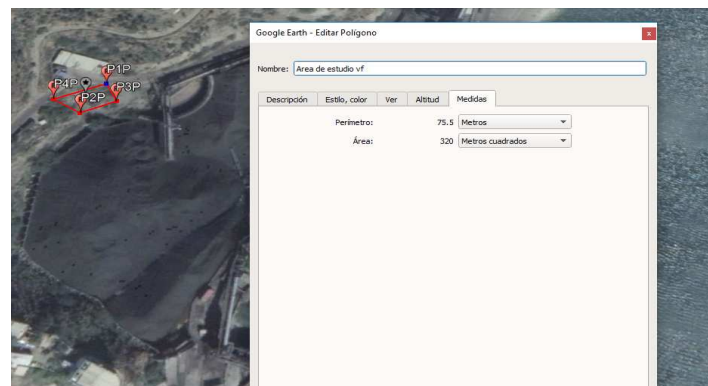


Figura 23. Datos y medidas del polígono de estudio – Levantamiento google earth. Fuente: Google Earth.(2017)

Muestreo.

Muestra representativa: Hace referencia a la parte de una Población, seleccionada adecuadamente para que esta (la pieza) conserve los aspectos y parámetros clave de esa población. Para el desarrollo de la investigación, se tomarán dos (2) muestras del área delimitada de 320m² dentro de una porción de los cerros de Punta Betín en el Puerto de Santa Marta. De estas dos muestras representativas será extraída información primaria de campo (In-situ). Así mismo de estas muestras seleccionadas serán extraídas cantidades conocidas de suelo, con el

propósito de replicar las características y condiciones del área de estudio en las unidades experimentales para el desarrollo de los ensayos.

Tipo de muestreo: Se tomarán dos (2) parcelas dentro de un área de 320m², las cuales representarán atributos y propiedades del suelo y la morfometría.



Figura 23. Parcelas que representan los 320m² –Punta Betín. Google Earth (2018)

Una vez identificadas las parcelas objeto de estudio, serán referenciados (in-situ) valores para tres (3) variables importantes, temperatura (ambiente y suelo), precipitación y pendiente. Así mismo se estudiarán variables de interés como: evaporación y velocidad del viento. De las muestras extraídas en las parcelas, se recolectará información primaria sobre las variables: conductividad hidráulica, saturación y capacidad de retención hídrica. Con el propósito de tener suficiente material para realizar pruebas de laboratorio, se establecen tres (3) apiques por cada parcela, extrayendo entre 0,100kg y 0,125kg por cada muestra de acuerdo con la Guía técnica para el muestreo de suelos; Universidad Nacional Agraria. 2017.

Posterior a la medición de estos parámetros (variables independientes), se realizará la extracción y homogenización de tres (3) muestras de suelo adicionales por cada parcela, resultando una nueva muestra de 3.000 grs que serán utilizados como superficie en el modelo a escala 1:50, desde se realizarán los experimentos.

Modelo experimental.

Dentro de este tipo de modelos, se destaca dentro del objetivo general, la necesidad de determinar si existe influencia de algunos factores sobre la variable de repuestas, que en este caso está definida por el Índice de Vulnerabilidad al desabastecimiento Hídrico (variable dependiente), y si la influencia existe poder cuantificarla.

Basado en la experimentación, este proceso se puede describir como la aplicación de un conjunto de manipulaciones, procedimientos y operaciones de control con el fin de extraer información no ambigua sobre el fenómeno que se trata de representar. El objetivo es demostrar que al utilizar un determinado tratamiento, se producirá una mejoría o cambio significativo en el proceso o en la variable de respuesta, demostrando a su vez que la manipulación de una variable independiente producirá un cambio de mayor magnitud. El experimento en si precede a la formación de condiciones especiales que producen los eventos deseados y bajo circunstancias favorables para la observación científica. Dentro de este proceso el experimentador toma parte activa en la producción de sucesos. (Ramírez, 2018).

La clave de este modelo radica en que el observador logre conseguir un valor significativo en los cambios que produzca el tratamiento, toda vez que esta (la magnitud de la diferencia) deberá ser muy superior a los errores clásicos de observación (error experimental). En estas condiciones se puede concluir que existió una influencia del factor y tratamiento sobre la variable de interés.

Propósito específico del experimento.

Determinar si existe una diferencia en los caudales remanentes que salen del sistema (Unidad experimental), luego de la instalación de unidades hidráulicas de regulación, a partir de una manipulación sobre la escorrentía superficial que se genera de forma espontánea luego de aplicar sobre el suelo una intensidad de lluvia de $I:63,3\text{mm/h}$, de acuerdo a intensidad media obtenida de datos arrojados por la estación meteorológica universidad del Magdalena (2018).

Elementos del Modelo Experimental.

Dentro del diseño experimental se presentan una serie de componentes clave para obtener valores representativos y poder alcanzar diferencias entre relaciones de variables, de tal magnitud que se pueda establecer un cambio en la variable de respuesta debido a los factores utilizados.

Dentro de estos elementos constitutivos del modelo experimental se establecen para esta investigación:

Factores.

Para esta experimentación en particular se pretende comprobar como las unidades de regulación hídrica pueden influir sobre el *Índice de Vulnerabilidad por Desabastecimiento Hídrico*, midiendo cuantitativamente la influencia asociada a la reducción de pérdidas de escorrentía

aprovechable al mar (Condición exorreica). A partir de lo anterior serán considerados los siguientes Factores tratamiento:

Índice del Uso del Agua.

Se tomara como referencia el consumo en términos de caudal máximo horario, representado por un porcentaje de la comunidad referenciada en la investigación (brr San Martin) y el consumo industrial horario representado por el Puerto de Santa Marta.

Este porcentaje representativo será la relación entre el área de estudio (320m^2) y la población (de acuerdo a densidades poblacionales calculadas por el autor) que ocuparía esos 320m^2 . Para el caso de demanda industrial se proyecta un consumo basado en los mismos 320m^2 .

- Representación en la unidad experimental: Para esta investigación en particular y los análisis derivados de los ensayos, se determinara la demanda hídrica de acuerdo al cálculo de caudales por población y uso en general, y a partir de estos se realizaran las proyecciones para el cálculo de Uso de Agua de acuerdo a la oferta hídrica.

Capacidad de Retención Hídrica (Se establece un paralelo asociándolo directamente con el IRH).

Para el escenario que contempla las unidades hidráulicas de regulación, la capacidad de retención hídrica estará relacionada en esta investigación con el volumen de agua que queda retenido, luego de extraer de la ecuación las retenciones por saturación. Esta capacidad de retención hídrica será definida desde la unidad experimental y a partir de un balance de masas entre el volumen que entra al sistema (intensidad – área aportante) y los volúmenes que salen del sistema

(demandas por uso del agua – pérdidas por escorrentía exorreica). Esta variable toma un valor de cero (0) dentro de un escenario sin unidades hidráulicas de regulación.

- Volumen de agua que ingresa al sistema (V_e)
- Volumen de agua que sale del sistema (V_s)
 - Volumen por uso del agua.
 - Volumen por pérdidas al mar.
- Volumen retenido por el sistema (V_{rr}).

De acuerdo a esto se define e identifica plenamente la variable de respuesta o como el Índice de Vulnerabilidad al Desabastecimiento Hídrico. (“Y”) y los cambios que los factores tratamiento logren ejercer sobre esta.

En cuanto al factor incidente, se define como variable explicativa la matriz de relación entre el Índice de Uso del Agua (oferta – demanda) y el Índice de Regulación Hídrica (estado de pérdidas de caudal remanente). (“X”).

Factores Bloque.

Son considerados dentro del experimento como elementos con potencial de control y a su vez como aportantes de conocimiento previo sobre las condiciones que pudieran llegar a “rodear” e influir sobre la variable de respuesta. Con la capacidad de ser fijados en distintos niveles y la posibilidad de controlar su efecto a esos niveles, el observador busca mantener el valor de estos factores constantes (en lo posible) para un grupo de ensayos en las unidades experimentales. De

este Factor no se pretende conocer su influencia sobre la variable respuesta, incluyéndolo con el fin de disminuir la variabilidad residual dentro del modelo experimental.

Dentro de los Factores Bloque a considerar en el experimento se encuentran:

- Precipitación. (Intensidad-Duración-Frecuencia)
- Saturación del suelo.
- Pendiente.
- Evaporación.
- Conductividad hidráulica.

Estos Factores serán medidos previos a los ensayos, realizando estas mediciones en campo y laboratorio, utilizando siempre el área de estudio representada por las parcelas No.3 y No.8. Con esto se pretende realizar una simulación y homologación de características (parcelas), donde la variación de estos para cada tratamiento será tomada como despreciable, debido a que las condiciones geográficas, geomorfológicas y meteorológicas presentan características muy similares, sumado a que la variación temporal de estas no hace parte del objeto en el presente estudio.

De acuerdo a lo anterior, estos Factores serán medidos en campo y laboratorio antes de realizar los ensayos, con el fin de conocer su valor e integrarlo a las ecuaciones de cálculo y los análisis de resultados. El valor de estos Factores será estabilizado durante los ensayos que se realicen sobre las unidades experimentales con el propósito de disminuir el error experimental.

Factores Ruido.

Estos son utilizados cuando existe interés por la variabilidad que puedan aportar sobre la respuesta en condiciones experimentales, en este caso los factores “coexisten” con los demás factores, toda vez que la magnitud de estos en las unidades experimentales, no ofrecen preocupación por efectos sobre la variable de respuesta. Para esta investigación particular se identifican y relacionan dos (2) Factores de ruido, sin que se realicen bloqueo sobre los mismos:

Velocidad del viento y la temperatura ambiente.

Estos Factores, fundamentan su capacidad de variabilidad sobre la respuesta en concordancia con los rangos de magnitud y tiempo en los que actúen, condición que para el fenómeno que se quiere estudiar dentro de un tiempo no mayor a 60 minutos, no representara ninguna influencia sobre la variabilidad final de la respuesta. Por tanto estos parámetros de velocidad de viento y temperatura aunque son referenciados, no obedecerán para este caso a factores de ruido que deban ser bloqueados, estando presentes en los ensayos sobre las unidades experimentales, pero sin incidencia sobre la variable de respuesta.

Modulo Experimental.

Unidades experimentales y tratamientos.

Una vez obtenidos los datos de campo sobre las parcelas, se reproduce un modelo a escala que guardara los atributos más representativos para la investigación en el área de estudio, como pendiente, saturación y tipo de superficie para la escorrentía, toda vez que la porción de suelo utilizada en el modelo a escala, será extraída en su totalidad del área de estudio. (Definido así por el autor).

A partir de este modelo a escala semejante a una porción del territorio estudiado (Escala 1:50) y que guarda directa relación con las características climáticas, geomorfológicas, hidráulicas, hídricas y pedológicas, se desarrollaran los ensayos que permitan coleccionar información primaria. El experimento se desarrollará bajo dos (2) escenarios específicos; el primero donde se proyectará la porción del territorio estudiado bajo las características actuales, como cuenca exorreica con niveles de drenaje de hasta segundo orden y esorrentía remanente directa a la Bahía de Santa Marta. La segunda tendrá como componente adicional la instalación y funcionamiento de las unidades hidráulicas de regulación, donde se determinará la capacidad de almacenamiento de agua por gravedad (percolación) en un tiempo determinado, así como la valoración sobre la disminución en los índices de vulnerabilidad al desabastecimiento hídrico, a partir de la disminución del déficit por demanda doméstica, en términos porcentuales y tiempo de cobertura del déficit. Todo lo anterior fundamentado en el aporte de estos elementos estructurales, dentro de un fenómeno típico de precipitación pluvial sobre el área de estudio.

Unidad experimental.

La unidad experimental se construirá a partir de un modelo a escala 1:50 del área de estudio (320m²), guardando las características morfométricas del terreno. Se construye a partir del polígono de lados 9m x 36m, configurándose finalmente un nuevo polígono de lados 0,18m x 0,72m y pendiente del 5%. Será construida con materiales impermeables (plástico) como superficie de soporte del suelo. El área de ensayos quedara delimitada por un perímetro de 1,8m y 0,13m² de superficie. Se realizarán tantos ensayos como sea necesario hasta lograr conseguir antes un patrón de comportamiento que permita validar la factibilidad de instalación de unidades hidráulicas de regulación sobre la sección transversal de la línea de escurrimiento principal.

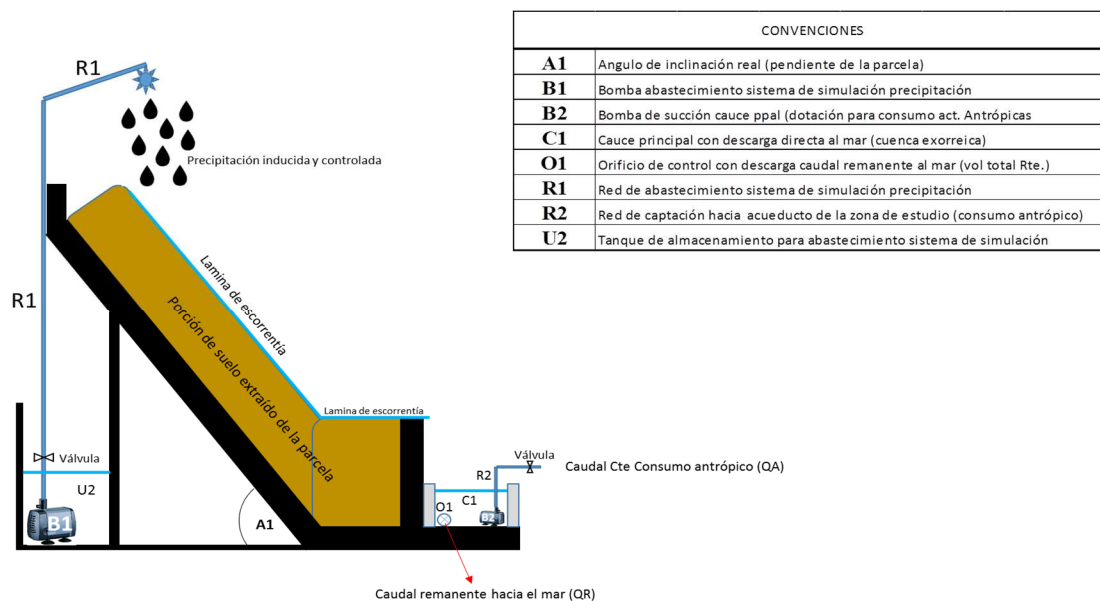


Figura 26. Modelo a escala (E_1) para ensayos sobre unidad experimental sin unidades hidráulicas. Propia. (2018)

Ensayo No.1:

De acuerdo a la Figura 26 - se realizará la simulación del fenómeno de precipitación pluvial ($I:63,3\text{mm/h}$) el cual deberá derivar en una escorrentía superficial sobre el área aportante en el modelo a escala (1:50) con suelo extraído del área de estudio y bajo las mismas condiciones de pendiente que maneja el terreno real. Esa escorrentía llegará a un tanque colector donde mediante aforo volumétrico se realizarán los respectivos balances de materia.

Los volúmenes serán segregados en consumo antrópico (comunidad + industrial) y escorrentía afluente al mar Caribe (bahía de Santa Marta). Esta última representa la masa de agua “perdida” sobre un valor neto de Intensidad igual a $63,3\text{mm/hr}$ ($Q_p = 96\text{ml/min}$), intensidad que fue tomada de una serie de datos de la estación meteorológica de la universidad del Magdalena en la ciudad de Santa Marta y verificada de acuerdo a una intensidad, duración y frecuencia (I-D-F) basada en curvas estandarizadas del IDEAM para la universidad del Magdalena. Esta precipitación se dará dentro de un área superficial aportante representada por el área de estudio a escala 1:50. La materia faltante (agua en litros) en el balance será tomada como pérdidas por saturación, para lo

cual el suelo será saturado a su máxima capacidad, tomando como referencia la prueba de retención de humedad realizada previamente en campo y laboratorio sobre estos parámetros (suelo expuesto), para aplicar este resultado posteriormente en la ecuación general de balance de masas.

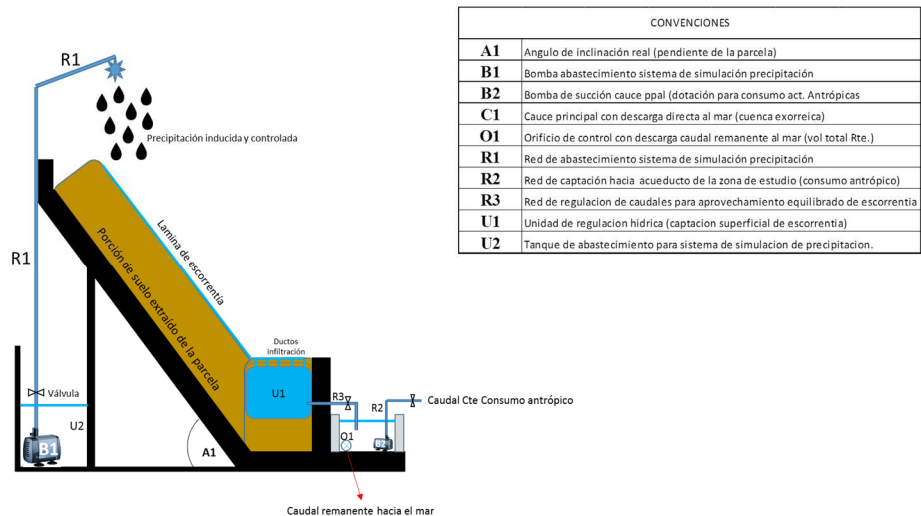


Figura 27. Modelo a escala (E2) para ensayos sobre unidad experimental con unidades hidráulicas. Propia (2018).

Ensayo No. 2:

De acuerdo a la Figura 27 - se realizará la simulación del fenómeno de precipitación pluvial (I:63,3mm/h) el cual deberá derivar en una escorrentía superficial sobre el área aportante en el modelo a escala (1:50) con suelo extraído del área de estudio y bajo las mismas condiciones de pendiente que maneja el terreno real. Esa escorrentía llegará a un tanque colector donde mediante aforo volumétrico se realizaran los respectivos balances de materia. Los volúmenes serán segregados en consumo antrópico (comunidad + industrial), retención en unidades hidráulicas de regulación y escorrentía afluente al mar Caribe (bahía de Santa Marta). Esta última representa la masa de agua “perdida” sobre un valor neto de Intensidad igual a 63,3mm/hr (Qp= 96ml/min), intensidad que fue tomada de una serie de datos de la estación meteorológica

de la universidad del Magdalena en la ciudad de Santa Marta y verificada de acuerdo a una intensidad, duración y frecuencia (I-D-F) basada en curvas estandarizadas del IDEAM para la universidad del Magdalena. Esta precipitación se dará dentro de un área superficial aportante representada por el área de estudio a escala 1:50 Para esta prueba se adicionaran al modelo experimental las unidades hidráulicas de regulación. Estas unidades hidráulicas se calculan, construyen e instalan con el objetivo de conocer cuánto de ese caudal de escorrentía superficial pueden captar (de forma natural sin equipos mecánicos) por simple percolación, valorando la contribución sobre el equilibrio hídrico inmediato en la zona de estudio. Este ensayo será determinado por un caudal de entrada (escorrentía) y tres (3) caudales de salida así: retención en unidades hidráulicas – demanda población/industria – escurrimiento directo al mar. (Ver Figura 28). La eficacia de las unidades de regulación, será definida por la capacidad de captación de aguas de escorrentía y asumida como el Índice de Retención Hídrica (IRH), la capacidad de abastecimiento sobre la demanda de la población (IUA) y el tiempo de oferta de caudal aprovechable.

Para los dos Ensayos la demanda doméstica/industrial, no sufrirá variaciones a lo largo de los 60 minutos, tiempo de duración propuesto para cada ensayo por unidad experimental. Lo anterior a fin de establecer análisis y relaciones más significativos con las pérdidas de agua al “mar” en cada momento (tx) registrado. Las demandas serán calculadas bajo referencias tomadas de sistemas de acueducto en Colombia para la costa caribe (Gestión de demanda y optimización operacional; Gil, 2009). Toda vez que los caudales de demanda doméstica e industrial (Dh) serán calculados a partir de relaciones con la misma escala de las unidades experimentales, escala 1:50 respecto a los 320m² así:

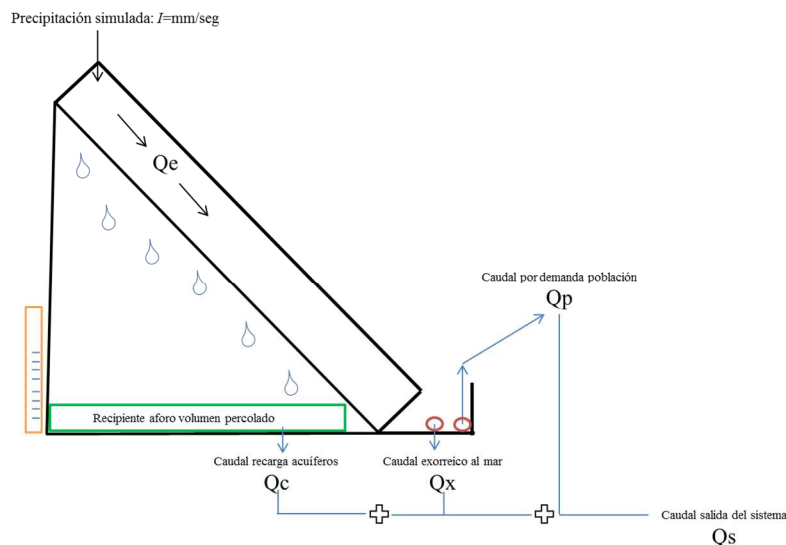
- Densidad poblacional San Martin: $2.500 \text{ hab}/64.000\text{m}^2 = 0,040\text{hab}/\text{m}^2$
- Proyección hipotética de la población en los 0,13m² (área a escala 1:50) = 0,26 hab (hipotético).
- Demanda doméstica para ensayos= $0,26 \text{ hab} \times 90\text{lbs}/\text{hab}.\text{dia} = 0,97\text{lbs}/\text{h}$
- Demanda industrial para relación 1:50= $4,7\text{lbs}/\text{m}^2.\text{dia} \times 0,13\text{m}^2 = 0,025\text{lbs}/\text{hr}$

Modelo Experimental: *Diseño del experimento.*

Variable independiente como factor estudiado. Factores estudiados por el investigador para probar los efectos sobre la variable dependiente.

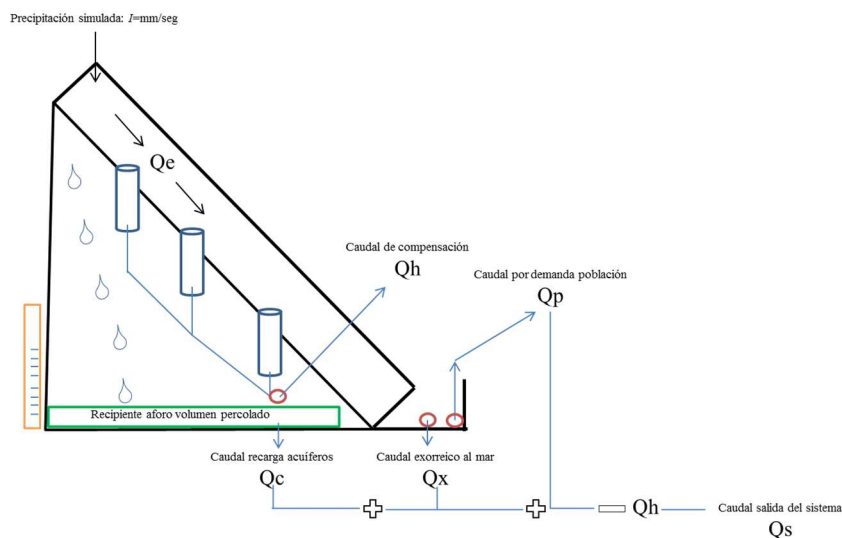
Se define para este experimento:

- IUA: Índice de uso del agua.
- IRH (CRH): Capacidad de retención hídrica.



(IVH): Matriz de relación IUA/IRH

$$*Volumen retenido = Ve - (Vol demanda + volumen exorreico)$$



FLUJO LOGICO.

- *Cuales pruebas
- *De qué manera
- *Obtención de datos
- *Análisis estadístico
- *Evidencia objetiva
- *Respuesta a interrogantes

----- o ----- o -----
Asumir como verdadera

H₁

Cuando las consecuencias y los datos correspondan.
----- o ----- o -----

Variables consideradas.

- *Precipitación.
- *Volumen de salida del sistema.
- *Volumen exorreico.
- *Volumen de entrada al sistema.
- *Volumen por demanda.
- *Población
- *Industrial
- *CRH: Variable independiente 2
- *IUA: independiente 1
- *IVH: Variable dependiente.
- *Evaporación.
- *Saturación de humedad del suelo (%)
- *Pendiente

Idealización de escenarios y relaciones.

Una vez definidas las variables de interés en el estudio, las unidades piloto de ensayo y los fenómenos de observación, se plantea la estructura de los escenarios de experimentación, desde un modelo idealizado de equivalencias entre variables y comportamiento (manipulado) de los componentes básicos de esta investigación.

- *Demanda por uso industrial:* Corresponde al volumen diario consumido por el Puerto de Santa Marta en su filial Carbosan y compone $\frac{1}{2}$ de la demanda total de los ensayos ($D_h/2$). Se considera que esta variable dentro del sistema permanece constante y para efectos de ensayos se toma durante todo el tiempo su valor pico (caudal máximo horario), debido a que los procesos que generan esta demanda presentan un comportamiento equilibrado a lo largo del día (24 horas). Por tanto, dado a que los procesos que demandan el recurso se encuentran asociados al control ambiental sobre áreas de superficie específicas del terminal portuario, los volúmenes consumidos corresponderán a los controles ambientales ejercidos sobre un área de 320m^2 (área de estudio) y no al total de extensión del terminal.
- *Demanda por población asentada en el área de estudio:* Para el caso particular se determina la comunidad del barrio San Martín en Santa Marta, población asentada cerca del Puerto de Santa Marta. Para efectos de la investigación el caudal escogido se calcula en base a una población de 2.500 habitantes y una dotación de 90 l/p.día (RAS 2010). El caudal en este caso será variable de acuerdo a las curvas de concentración de demanda estándar para la costa caribe y se determina en base a la población que ocuparía 320m^2 (área de estudio) y no sobre los 2.500 habitantes. Lo anterior se calcula de acuerdo a la

extensión del barrio San Martin y su población, llevándolo a densidad poblacional (hab/m^2) a los 320m^2 . Este comportamiento idealizado de acuerdo a los procesos industriales que se desarrollan, permite establecer también un caudal máximo horario a lo largo del periodo de análisis. Este consumo corresponderá a $\frac{1}{2}$ de la demanda total considerada en la investigación.

Las condiciones anteriores hacen parte del modelo que se pretende estudiar, sin embargo, es preciso presentar una idealización de lo que sería esta relación temporal entre oferta (precipitación – regulación) y la demanda (consumo industrial – humano), dentro de un escenario con fluctuaciones en la dinámica temporal.

Comportamiento típico propuesto de demandas en un análisis temporal.

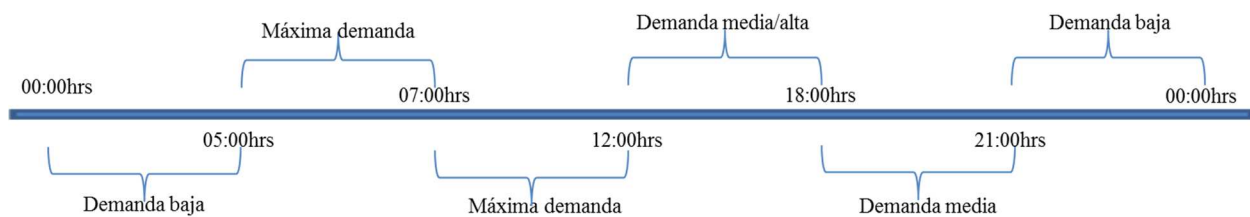


Figura 28. Dinámica de demandas en el entorno operativo del área de estudio. Propia. (2019)

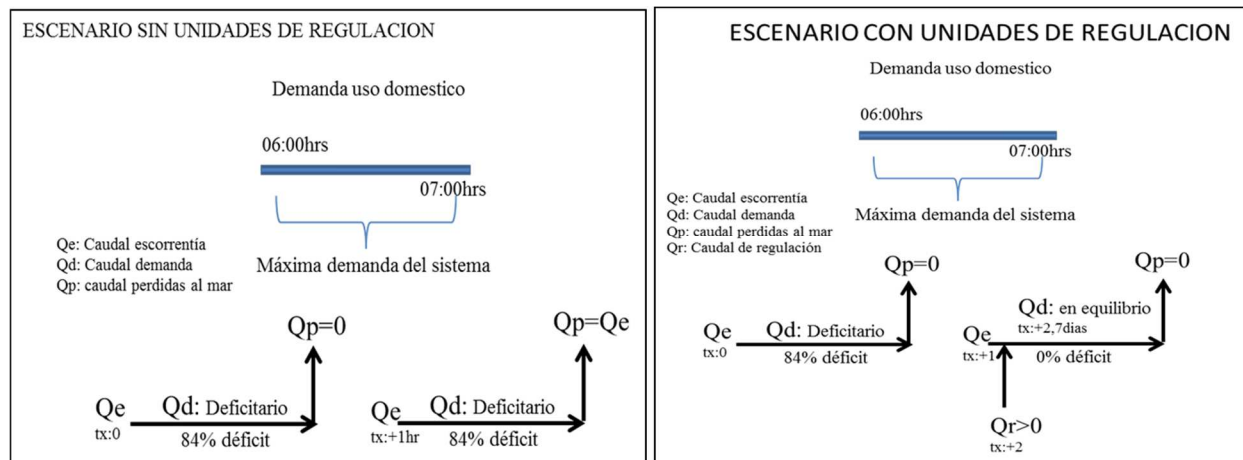


Figura 29. Comportamiento del sistema oferta / demanda en escenarios sin regulación y regulado. Propia. (2019)

La Figura 30 muestra una representación de cómo se comportaría el área de referencia en un fenómeno de precipitación de $P=12,1\text{mm/día}$ para $D=60$ minutos. Como se aprecia en la imagen de la izquierda, aunque la precipitación generara caudales de escorrentía altos, estos se pierden al mar por su condición exorreica y falta de regulación, continuando la comunidad del barrio San Martín en condición deficitaria en un 85%. En cambio, el recuadro de la derecha esquematiza el mismo proceso de precipitación, pero con unidades hidráulicas de regulación, mostrando que no se perdería agua de escorrentía al mar y al contrario se podría llevar a cero por ciento (0%) el déficit por uso doméstico, por espacio de 2,7 días.

Para esta investigación tanto el caudal ambiental como las salidas del sistema por percolación o evaporación serán despreciados, toda vez que las condiciones del suelo, pendientes, temperatura y ausencia de acuíferos no permite estos escenarios. Por tanto, el análisis quedaría de la siguiente manera:

- ESC (Escorrentía superficial): Será igual a la precipitación media para la ciudad de Santa Marta, tomada de los datos de la estación meteorológica de la universidad del Magdalena para el año 2018, para una intensidad de $I: 63,3\text{mm/hr}$.
- IUA (Agua utilizada en relación con la oferta): $(Dh/Oh)*100$; Oh es la oferta sustrayendo el caudal ambiental, en este caso será la oferta completa y Dh corresponde a la demanda doméstica e industrial descrita y calculada en apartes anteriores.

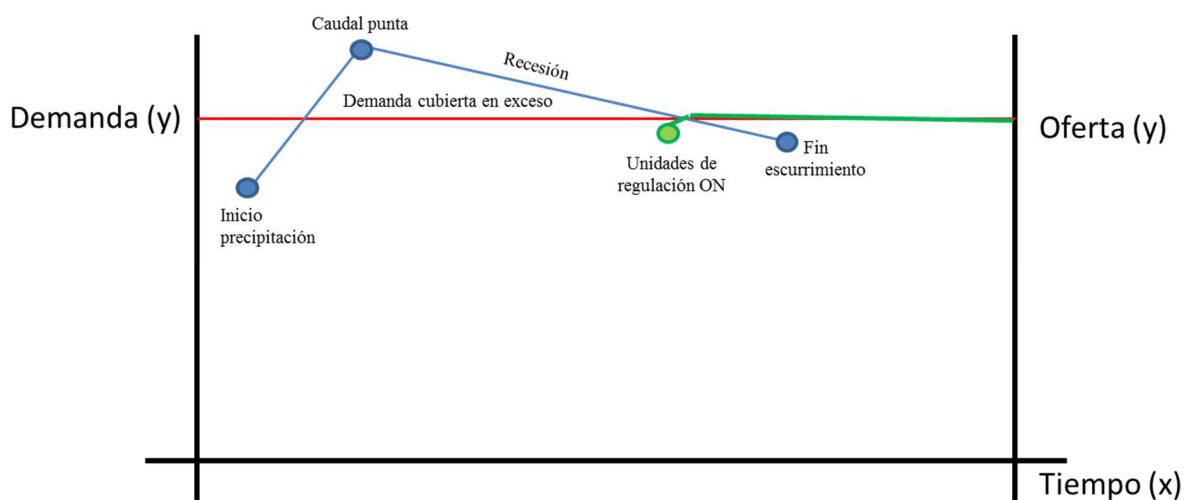


Figura 30. Comportamiento esperado del sistema con aporte y regulación de las unidades hidráulicas. Propia. (2019)

En la Figura 30, se muestra lo que sería el comportamiento del sistema bajo la influencia de las unidades de regulación hídrica. Con un caudal (Q_d) variable de acuerdo a las horas del día según concentraciones de la demanda. De acuerdo con los argumentos expuestos en numerales anteriores, se observa que cuando se agota la escorrentía superficial disponible, las unidades hidráulicas de regulación aportarán un caudal capaz de satisfacer un porcentaje de la demanda total (industrial y comunidad) por un tiempo determinado, condiciones que serán objeto de estudio. Lo anterior sumado al componente más importante derivado de la regulación, el cual se fundamenta en que no se presentarán pérdidas hacia el mar por condiciones de oferta mayor a demanda, toda vez que las unidades hidráulicas de regulación pueden entregar el caudal sincronizado según relación oferta/demanda, de acuerdo a cálculos previos al evento.

Elementos y variables fundamentales para dimensionar la importancia de la variable de respuesta

- Tiempo de precipitación.
- Tiempo de concentración.
- Tiempo de escurrimiento.
- Volumen escorrentía superficial (por intensidad, área aportante y duración).
- Volumen perdido (escorrentía hacia el mar).
- Volumen consumido por demanda (Población / Industria).
- Volumen captado por las unidades hidráulicas.
- Porcentaje de cobertura sobre la demanda total.
- Tiempo máximo de cobertura sobre la demanda a un porcentaje predefinido.

TRABAJO DE CAMPO.



Figura 31. Recoleccion de suelo sobre parcelas. Puerto de Santa Marta, cerros punta Betin. Propia; 2019.

Establecida la metodología de investigación y el método experimental, el proceso entra en su etapa práctica con la recolección de información primaria necesaria para el desarrollo de los ensayos a escala 1:50, la cual será obtenida de las parcelas No.3 y No.8 dentro del área de estudio en los cerros de punta Betín en el Puerto de Santa Marta. De acuerdo al contexto de la investigación, el primer acercamiento al área de estudio tendrá como propósito la extracción de información meteorológica y física, representada en las variables de mayor interés para el experimentador.

Dentro de las variables de mayor relevancia por su aporte al modelo experimental y unidades de ensayo (prototipos), se prestará especial atención sobre:

**Capacidad o porcentaje de saturación:* La importancia de medir esta variable en campo es la de determinar a qué % deberá saturarse para la prueba. Recordemos que la escorrentía en estos casos se da en superficies de baja capacidad de retención / infiltración, por efecto de la permeabilidad, porosidad y texturas (en ocasiones lecho de roca a menos de 5cm de la superficie de escurrimiento)

**Porcentaje de humedad:* medida directamente en el área de estudio, este parámetro es de suma importancia para determinar los volúmenes de agua necesarios para la saturación y generación de escorrentía en las unidades experimentales. Además del componente hidráulico, este valor podría ser utilizado para la determinación de uno de los caudales de salida del sistema para el balance hídrico en el caso que la diferencia entre entradas y salidas sea mayor al error experimental.

**Pendiente:* variable medida directamente en la superficie de estudio, el valor de esta tiene especial significancia en los procesos de escurrimiento y pérdidas de caudales al mar.

Flujo lógico del trabajo en campo.

Delimitación del área de estudio: Se traza un rectángulo sobre la zona escogida, siguiendo los valores determinados en la metodología.

- Lado: 36 m
 - Lado: 9 m
- } Área superficial: 324m²



Figura 32 .Levantamiento en campo y delimitacion area de estudio. Propia. 2019

El polígono que encierra el área de estudio (320m^2), se traza de manera tal que los dos lados menores (9mts) queden posicionados hacia la ubicación Norte - Sur, mientras que los lados mayores (36mts) quedaran sobre las ubicaciones Este – Oeste. Este posicionamiento del polígono, expondra a la escorrentia a una mayor velocidad de flujo (area transversal), permitiendo valorar las unidades experimentales sobre una condicion mas critica (menor posibilidad de infiriltracion) de la que el terreno por si mismo ya le genera.

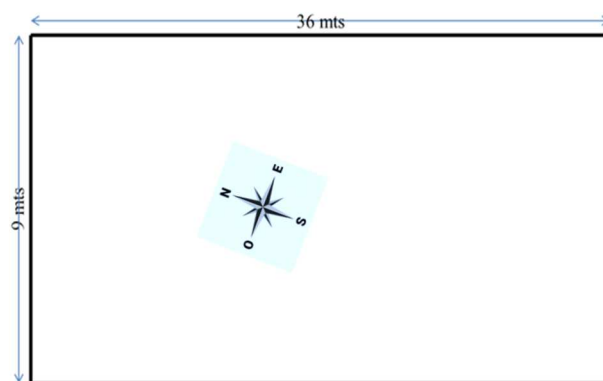


Figura 33. Geometria y ubicación del poligono representativo del area de estudio.Propia. 2019.

Apiques a cielo abierto: Se realizan en total nueve (9) apiques alineados en “N”. Cada apique cuenta con lados estándar de $0,25\text{mts} \times 0,25\text{mts}$, superficie desde la cual serán extraídos datos de campo (parámetros de medición in situ), así como muestras de suelo para análisis específicos en laboratorio y uso en las unidades experimentales.

Especificaciones:

- Numero de apiques: 9 unds.
- Área superficial: $0,062\text{m}^2$
- Área total apiques: $0,56\text{m}^2$
- Área transversal: $0,05\text{m}^2$.
- Profundidad: $0,20\text{ m}$.
- Volumen: $0,0125\text{m}^3$.



Figura 34. Proceso de excavacion y conformacion de puntos de muestreo y pruebas de campo. Propia. 2019

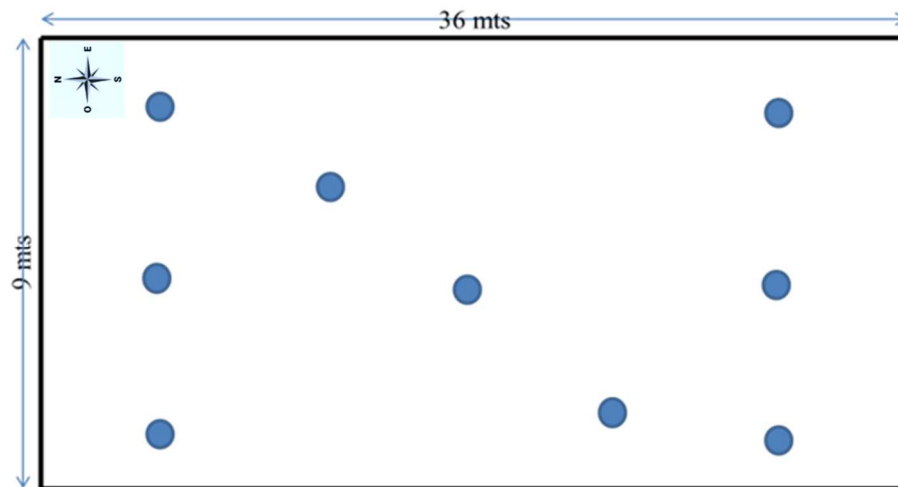


Figura 35. Ubicación de puntos de muestreo dentro del area de estudio – Conformacion en “N”. Propia. 2019

Los apiques a cielo abierto repartidos por toda el área de estudio, tienen el propósito final de establecer una referencia para la colección de datos meteorológicos, toma de muestras y medición de parámetros in situ referentes a la capacidad hidráulica del suelo. De la misma manera se pudo obtener información valiosa del tipo “común” de perfil en esta zona de estudio. De acuerdo con la Figura 36, cada punto azul corresponderá a un apique de muestreo a cielo abierto. Una vez tomados los datos de campo se procede a seccionar en ocho (8) parcelas el área de estudio y tomar específicamente las parcelas #3 y #8 según datos obtenidos en el método aleatorio.

Construcción de parcelas: La selección de dos (2) parcelas dentro del área de estudio de 320m², se lleva a fase de campo, definiendo como el total del espacio físico ocho (8) unidades simétricas dentro del área de estudio.



Figura 36. Cosntruccion de parcelas de muestreo.Fuente: Propia.2019.

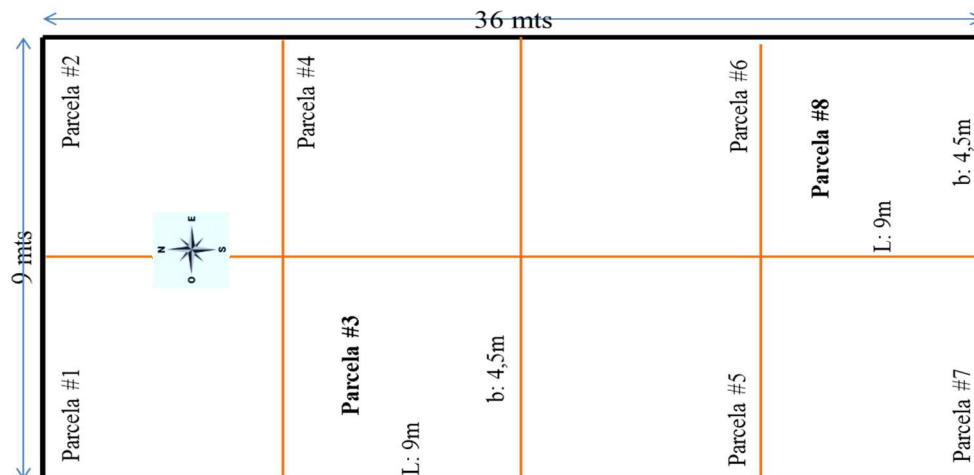


Figura 37 .Configuración final de parcelas de muestreo. Propia. 2019.

Dentro del desarrollo del trabajo de campo, serán objeto de estudio las parcelas No.3 y No.8, de acuerdo a la selección realizada previamente sobre el total de parcelas que conforman el área de estudio, representado las características de los 320m² y con las características de los cerros de Punta Betín.

Muestreo e información primaria.

Definidas las parcelas de trabajo y recolección de información, se avanza en el proceso de monitoreo de parámetros climáticos, pruebas directas en los apiques y extracción de muestras de las parcelas escogidas.



Figura 38. Preparación del terreno para la extracción de información primaria. Propia. 2019.

Determinación de la pendiente.

La pendiente fue establecida de acuerdo al flujo lógico que seguirá la escorrentía en el área de estudio. Ubicando este flujo de Norte a Sur y con la ayuda de un equipo electrónico calibrado (Hipsómetro) se procedió a determinar el ángulo de inclinación entre la línea de escorrentía entre las caras descritas



Figura 39. Determinación de la pendiente en el área de estudio con equipo electrónico (Hipsómetro). Propia.2019

Determinación de la humedad del suelo.

Considerado como la cantidad de agua contenida en la estructura del suelo, la humedad en este caso abarca la porción capilar y gravitacional, sin que se realicen ensayos o valoraciones sobre el componente molecular en términos de humedad del suelo.

El valor de la humedad se determinó finalmente con ayuda de un Humidímetro – pHmetro, equipo que mide el contenido de agua superficial o capilar en un punto específico de la estructura del suelo. Con el fin de apoyar este resultado, se realizó una medición adicional con otra metodología, consistente en extraer la muestra de suelo del área de estudio, depositarla en un beaker y estabilizarla rociando agua en la superficie.



Figura 40. Determinación de la humedad del suelo mediante dos metodos y un equipo. Propia.2019

Para el desarrollo de todas las pruebas se extrajo del área de estudio una muestra compuesta de 1.673 g, como muestra compuesta de cuatro apiques en las parcelas No.3 y No.8, de 420grs aproximadamente por cada muestra simple. Utilizando una porción de la muestra compuesta (1000cm^3) y completando el volumen del cono Imhoff para sostener una lámina de agua sobre la superficie de suelo. (Figura 40).



Figura 41. Toma de muestra en area de estudio para pruebas de conductividad hidraulica. Propia.2019



Figura 42. Toma de muestra en area de estudio para pruebas de conductividad hidraulica. Propia.2019

Determinación de la capacidad de infiltración del terreno.

Asociada también a la conductividad hidráulica de Darcy (Romero, 2006). Esta capacidad que presenta las superficies, corresponde en cierta forma a una velocidad de penetración regida en condiciones naturales por la gravedad. Para el caso específico la capacidad de infiltración fue medida con el fin de establecer su incidencia sobre el proceso de esorrentía y flujo de pérdida al mar, o establecer que es despreciable de acuerdo a los valores que pudiera arrojar. Es de suma importancia tener claridad sobre que este resultado no contempla las condiciones topográficas del terreno (pendiente), razón por la que la infiltración solo obedece a fuerzas de gravedad sobre el componente vertical del terreno. Se desarrollan pruebas (igual que para la humedad) en dos escenarios diferentes, in situ y en laboratorio así:

Para la prueba in situ se realiza en correspondencia con el protocolo obtenido del documento del articulo técnico ¿Cómo hacer pruebas de infiltración? (Rosales, 2018). Se realiza sobre el terreno un orifico cuadrado desde donde se tomaran los datos de infiltración de acuerdo a la velocidad de penetración que presente el fluido (en este caso agua) con el que se llena el orificio.



Figura 43. Determinacion de la capacidad de infirltracion del terreno.Cerros de punta Betin.Propia (2019)

Con el propósito de relacionar dos escenarios de información, se realiza la prueba de infiltración en laboratorio, extrayendo una muestra desde el área de estudio y estableciendo el valor de la infiltración de acuerdo la siguiente metodología:

Preparación del ensayo

- 420 g de muestra de suelo
- Cono Imhoff de 1000 ml
- 200 ml de agua.

Determinación de la precipitación.

Esta medición se encuentra relacionada específicamente con la cantidad de agua que pueda ser recolectada en un área específica y durante un fenómeno de precipitación pluvial, donde la precipitación será la cantidad total en unidad de volumen y la intensidad corresponde a una tasas valorada en el mismo volumen por unidad de tiempo. La medición se realiza con el fin de tener una referencia con los valores históricos y valores del año 2018 facilitados por Corpamag. Luego de varios intentos y debido a las condiciones meteorológicas y los fenómenos (niño) presentados en el 2019, solo fue posible tomar una medida al momento de estructuración de esta investigación, así:

Preparación para el muestreo

- Cono Imhoff de 1000 ml.
- Área orificio de entrada: $0,11\text{m}^2$
- Hora instalación: 8:00am



Figura 43. Determinacion de la precipitacion e intesidad pluvial. Propia.2019

Determinación de la evaporación.

De acuerdo a las referencias de procedimientos expuestas en el componente metodológico de este documento, la cuantificación de agua evaporada dentro de unos factores conocidos de temperatura, presión y vientos, se obtiene a partir de la perdida por cambio de estado de una masa de agua conocida en un área superficial de referencia, dentro de una unidad de tiempo. Para el caso específico de la medición de evaporación en el área de estudio, se realiza a partir de un recipiente circular en aluminio, aislado del suelo (intercambio de calor con conducción). El recipiente se llena con un volumen de agua conocido inicialmente, el cual determina un nivel de lámina de agua dentro del recipiente. Al paso de un tiempo se procede a medir los cambios en el nivel de la lámina de agua y a determinar por medio de un recipiente aforado el volumen neto perdido.



Figura 45. Determinacion de la evaporacion en campo. Propia.2019

Determinación de la temperatura y velocidad del aire.

Siguiendo los lineamientos expuestos en el componente metodológico de este documento, se realiza la toma de temperatura en el área de estudio, tanto del aire como del suelo, así como la velocidad del viento. La medición se realiza entre las 11:30 hrs y las 12:45 hrs del día. Esta medición se obtiene por medio de un anemómetro digital, el cual da la posibilidad de registrar en la misma medición velocidad y temperatura. Para este muestreo in situ se registraron valores de temperatura promedio y velocidad del viento promedio de 34,3°C y 3,3km/hr respectivamente (ver procedimiento en Figura 46).



Figura 47. Determinacion de la temperatura y velocidad del viento. Cerros de punta betin. Propia.2019

Determinación de la temperatura y humedad del suelo.

Para la temperatura del suelo se utilizaron dos tipos de equipos, con el fin de observar el margen de diferencia entre ambos y promediar el dato que sería registrado finalmente. Para el equipo de contacto directo (ver Figura 47) el resultado promedio de la temperatura arrojó un valor de 50°C. En el caso de la pistola de temperatura por infrarrojo, el valor promedio alcanzo los 48,4°C (ver Figura 48).



Figura 47. Determinacion de la temperatura del suelo #1. Cerros de punta Betin. Propia.2019



Figura 48. Determinacion de la temperatura del suelo #2. Cerros de Punta Betin. Propia.2019

En cuanto al parámetro relacionado con la humedad del suelo, este se mide utilizando un Humidímetro de contacto para sólidos. De acuerdo a las mediciones realizadas en las parcelas de estudio, el suelo en ese instante (11:30am – 12:45pm) contaba con una saturación de humedad del 20%. (Ver Figura 49).



Figura 49. Determinación de la temperatura del suelo. Cerros de punta Betin. Propia.2019

De acuerdo con cada uno de los procedimientos presentados en la etapa metodológica de este estudio, se logra recolectar la información primaria necesaria y suficiente para el desarrollo a continuación de los experimentos en las dos unidades experimentales dispuestas para tal fin.

Resultados preliminares en variables de interés.

Caculo de variables morfometricas del área de estudio.

Con el propósito de obtener información que pueda ser utilizada para establecer relaciones funcionales entre el comportamiento tanto de la esorrentía como de las Unidades de Regulación Hídrica en la porción de cerro de Punta Betín en el terminal Portuario de Santa Marta (área de estudio), se calculan los parámetros en términos de forma y drenajes más importantes dentro de un análisis de cuencas.

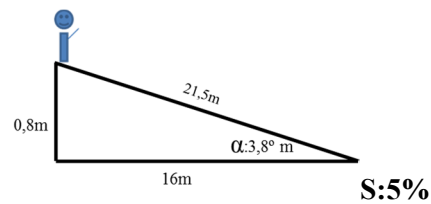
Tabla 2. Resultados de los parámetros más representativos del are de estudio medidos en campo

PARAMETRO	VALOR
Área de la cuenca: $A(m^2)$.	$A=324m^2$
Longitud de la cuenca: $L(m)$	$L=36 mts.$
Ancho de la cuenca: $A/L(m)$	$B=9 mts.$
Perímetro: $P(m)$	$P=90 mts.$
Factor de forma: $K_f(ad)$.	$K_f=0,25 (bajo)$
Longitud del cauce: $L(Km)$.	$L_c=0,036 (Km)$
Coeficiente de compacidad: $K_c(ad)$.	$K_c=2,44$ (Clase III; oval-oblonga a rectangular-oblonga)
Longitud axial: $L_{ax}(Km)$.	$L_{ax}=L$
Pendiente media: $S(m/m)$.	$S= 0,05m/m$

Fuente: Propia (2019)

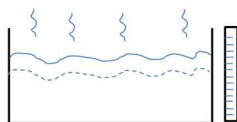
Variables determinadas en campo.

➤ Pendiente:



- ☐ L: 16 m
- ☐ X: 25 m
- ☐ H: 0,8 m
- ☐ α : 3.8°

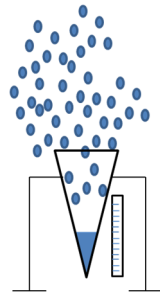
➤ Evaporación:



- ☐ Volumen inicial de agua: 1,5lts
- ☐ Hora de inicio: 7:30am
- ☐ Hora final: 4:30pm
- ☐ Nivel inicio: 3cm

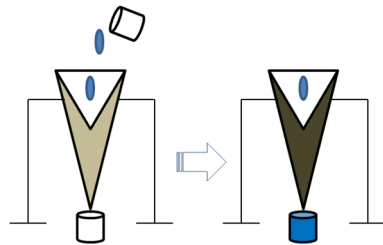
- Nivel final: 2cm
- ΔN : 1 cm
- H: 6,5cm
- Área del recipiente: 0,05m²
- Volumen evaporado: 0,5lts
- Δt : 9hrs.
- Tasa de evaporación: 2,2cm/m².hr
- Caudal de evaporación: 1,1lts/m².hr

➤ Precipitación:



- Volumen neto colectado: 13ml
- Hora de inicio: 4:30pm
- Hora final: 3:00am (siguiente día)
- Pluviosidad: 1,2mm.
- Intensidad de Precipitación: 109ml/m².h
- Área del orificio: 0,011m².

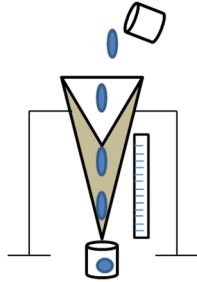
➤ Saturación de humedad:



- Peso beaker: 30grs
- Peso inicial muestra suelo: 390g
- Volumen inicial muestra: 270ml
- Humedad inicial: 50%
- Volumen inicial agua: 200ml
- Peso final muestra: 430g
- Humedad final: 80%

- Volumen agua remanente: 160g
- Tiempo: 11 minutos.
- pH inicial: 6,4
- pH final: 5,6
- Pto de saturación: 0,15ml/gr suelo.
- Tasa: 0,013ml/g.min

➤ Infiltración:



-
- Volumen de suelo: 270ml
- ΔH : 11,5cm
- Volumen de agua: 200ml
- Tiempo: 660seg.
- Tasa de infiltración: 0,017cm/seg.

Otras variables de campo.

- Velocidad del viento: 3,3km/hr
- Temperatura ambiente: 34,7°C
- Temperatura del suelo.
 - Pistola de temperatura: 48,4°C
 - Termómetro: 50°C.
- Humedad del suelo: 25%.

Los datos obtenidos en campo y laboratorio, son determinantes en la elección de los factores que finalmente serán bloqueados en la etapa de experimentación (Unidades experimentales), lo anterior de acuerdo al grado de condicionamiento que pudieran ejercer sobre las variables de entrada y la variable de respuesta.



Figura 50. Determinación de la saturación por humedad en laboratorio. Propia (2019).

En línea con lo anterior, el suelo utilizado para las unidades experimentales, será saturado previamente al 80% (sin importar el porcentaje de humedad inicial), con base a la tasa de saturación obtenida en pruebas de laboratorio (ver Figura 50) de 0,15 mililitros de agua por cada gramo de suelo. Esta condición de saturación, inmediatamente lleva el coeficiente de escurrimiento a un valor de $C=1$. En términos de pendiente, el modelo a escala de la unidad experimental, conservará la pendiente del 5%, según la obtenida en campo (ver Figura 51). La infiltración es despreciable para los ensayos en las unidades experimentales, toda vez que para un tiempo de concentración de 9,5seg, Calculado a partir de la formula $T_c = \frac{1,8*(1,1-C)*(3,28D)^{0,25}}{S^{0,33}}$; donde para efectos de la experimentación ($C=1$); ($D=0,70\text{mts}$); ($S=5\%$). Con este tiempo se lograría (en suelo no saturado y totalmente horizontal) una penetración de apenas 1,6mm.



Figura 51. Determinación de la pendiente en campo (Hipsometro). Propia (2019)

Para la evaporación (ver Figura 45) se obtuvo una tasa de $1,1 \text{ lt/m}^2 \cdot \text{hr}$, valor que al relacionarlo con el tiempo de concentración (t_c), tanto en el área de estudio como a escala 1:50, representaría una pérdida no mayor a $0,37 \text{ ml}$ por cada ensayo. Este factor finalmente será bloqueado dado que los experimentos se realizar bajo techo y a tempranas horas de la madrugada. Sin embargo, la evaporación deberá ser tomada en cuenta en los balances de masas calculados en el desarrollo de nuevas pruebas experimentales a mayor escala.

En síntesis, será bloqueada la incidencia de las variables de entrada sobre la respuesta, para los siguientes factores:

- Saturación: pérdidas de volumen en la salida del sistema por adsorción de humedad.
- Infiltración: Pérdidas de volumen a la salida del sistema por percolación hacia estratos bajos.
- Velocidad del viento: los ensayos se realizarán “Indorr” en un rango por debajo de los 4 km/hr .
- Temperatura: Se trabajará bajo condiciones de temperatura menor a los 25°C .

Experimentación.

La modelación de experimentos se utiliza con el propósito de verificar si unos determinados factores influyen en una variable de interés y si existe esa influencia poder cuantificarla (Marín, 2005). La experimentación se encuentra soportada a su vez por métodos estadísticos que permitirán al experimentador establecer diferencias objetivas entre diferentes factores y tratamientos sobre una unidad experimental. Esta última se podría definir como el material donde se realiza la evaluación de comportamiento de la variable de respuesta y al que se le aplicaran los distintos niveles de los factores tratamiento.

El propósito principal de la experimentación es será el de determinar si existe una diferencia medible en los caudales remanentes que salen del sistema (unidad experimental), a partir de la manipulación de la escorrentía superficial que se generara de forma espontánea luego de aplicar un volumen conocido y controlado de agua sobre el área aportante a escala 1:50 y luego de ser instalados unos recipientes de almacenamiento (tarros) que simularan las unidades hidráulicas de regulación.

Factores tratamiento con efecto sobre la variable de respuesta.

- *Índice de Uso de Agua (IUA)*: asociado a demandas calculadas y establecidas en el componente metodológico de este trabajo. Se tomará como caudal máximo horario en un periodo de una hora (periodo de duración de la precipitación).
- *Capacidad de retención hídrica (CRH)*: Asociado a la capacidad que presente el área estudiada (unidad experimental a escala 1:50 del área de estudio) para retener y posteriormente regular flujos de agua obtenidos de la escorrentía por precipitación pluvial. Esta capacidad en el área estudiada presenta un valor inicial

natural de cero (0), toda vez que, por condiciones probadas por los análisis de laboratorio, tanto la infiltración, como las pendientes, no permiten procesos de percolación y acumulación de agua en el subsuelo (acuíferos), en esta zona de la cuenca de estudio. En la experimentación, este factor será resultante de la manipulación de la “cuenca” a escala, toda vez que los elementos que permitirán la regulación hídrica son de origen antrópico y no corresponden a estructuras propias de la naturaleza del sistema. Estarán representadas por las unidades hidráulicas de regulación.

Experimentación bajo dos escenarios.

- **Cuenca exorreica sin unidades de regulación. (Cuenca #1):** corresponde al diseño piloto del área de estudio a escala 1:50, sobre el cual se dejará caer una precipitación (manipulada) de volumen conocido y en un tiempo establecido, sobre los 0,13m² de área definida como aportante. Esta unidad experimental tendrá la particularidad de ser incapaz de retener agua de la escorrentía superficial (más allá de la usada para la saturación del suelo), esperando como resultado un valor positivo en los volúmenes de entrada en el balance de masas, las cuales se trasladan finalmente a pérdidas por fuera del sistema (al mar). Todo el volumen que logre llegar al cauce de escurrimiento (recipiente de captación en la unidad experimental) será definido como agua que sale del sistema. Al momento de aplicar el balance de masas, a la izquierda de la ecuación representando las salidas estará la demanda (previamente definida en capítulos anteriores), la saturación del suelo y las pérdidas al mar, a su vez a la derecha de la ecuación estará el volumen precipitado (conocido).

- **Cuenca exorreica con unidades de regulación. (Cuenca #2):** corresponde al mismo diseño piloto a escala 1:50 del área de estudio. Se determinarán valores conocidos de precipitación como entrada al sistema (ídem al procedimiento Cuenca #1). Esta unidad estará diferenciada por la capacidad instalada (Unidades hidráulicas de regulación) que le permitirá retener una parte del volumen de escorrentía, gracias a estas estructuras hidráulicas ubicadas de forma perpendicular al flujo de escurrimiento dentro del área aportante. Esta condición se espera arroje un valor inicial de cero (0) en el balance de masas, toda vez que el agua que ingresa al sistema (precipitación), será igual al agua que sale por demanda, sumado al agua retenida por las unidades de regulación, consiguiendo finalmente llevar a cero las pérdidas por volumen al mar y permitiendo el aprovechamiento posterior a la precipitación de este volumen significativo en términos porcentuales (condición esperada).

Construcción de las unidades experimentales.

Los modelos a escala 1:50 en los dos (2) escenarios, fueron construidos con materiales comunes en base a plástico. Se optó por un método sencillo de construcción dentro del cual se pudieran realizar las observaciones que a criterio del investigador eran las más representativas, como pendientes, volúmenes de almacenamiento y comportamiento de las escorrentías.

Finalmente se preparan dos (2) unidades experimentales idénticas en área superficial y pendiente, donde la única variación se da en la instalación sobre una de estas, de recipientes que simularan las unidades hidráulicas de regulación.



Figura 52. Preparacion y construccion unidad experimental 2. Cuenca#2. Propia (2019)



Figura 53. Ajuste de la pendiente con estructura de soporte. Propia (2019)

Ensayos.

La determinación sobre el comportamiento de los flujos de entrada y salida de agua en el sistema (área aportante y cauce de escurrimiento) se realizará de acuerdo a:

- Instalación de las unidades experimentales: los ensayos serán realizados en un sitio cerrado y en tempranas horas de la madrugada, esto con el fin de bloquear factores como la temperatura (perdidas por evaporación) y el viento.
- Lógica del ensayo: se aplicará de manera regulada un volumen conocido de agua sobre cada una de las unidades experimentales. Con esta primera fase del ensayo se lograrán cubrir las demandas por saturación del suelo y una vez inicie la esorrentía superficial se realizaran las observaciones que tengan lugar.
- Cada una de las unidades experimentales recibirá el mismo tratamiento, realizando variaciones en los volúmenes precipitados ya que lo que se busca conseguir finalmente es el porcentaje de agua perdida o retenida.
- Una vez finalizada la aplicación de agua sobre el área aportante, se realizará la medición de los volúmenes en cada una de los recipientes de captación, derivando en relaciones porcentuales y balance de masas.

Esta es la metodológica general que será desarrollada para la obtención de datos que permitan verificar la factibilidad de instalación de las Unidades Hidráulicas de Regulación, sobre los cauces principales de escurrimiento, para mejorar los índices hídricos en el área de estudio.

- Variables de observación en la experimentación.
 - Volumen que entra al sistema: precipitación en relación al área en litros.
 - Volumen de agua que sale del sistema: Consumos y pérdidas al “mar” en litros.

- Volumen retenido por el sistema: Remanente en la ecuación de balance de masas.
- Capacidad de cobertura de la demanda: Porcentaje de volumen cubierto por la oferta instantánea.
- Capacidad de regulación de las unidades hidráulicas: Porcentaje de cobertura de la demanda y tiempo máximo de regulación.

Lo anterior dentro de la integración a una discusión amplia de resultados, toda vez que el estudio sobre la variable de respuesta se enfoca en las variaciones positivas o negativas que presente el Índice de Vulnerabilidad al Desabastecimiento Hídrico (IVDH) en cada uno de los escenarios de experimentación.

Ensayo Cuenca#1 (Unidad experimental 1).

Ficha general.

- Hora de inicio: 3:15 am.
- Hora finalización: 3:45 am
- Numero de ensayos: 8 unds
- Volumen total precipitado: 1.800ml
- Área aportante: 0,13m²
- Tiempo total precipitación: 11,45min
- Rata de precipitación: 157ml/min.
- Intensidad: 72,5mm/hr.
- Volumen almacenado tazón: 1.750ml
- Volumen saturación suelo: 50ml
- Tasa de retención: 0 ml/m²/min



Figura 54. Unidad experimental Cuenca#1.Propia (2019)

Una vez definidos los volúmenes que ingresarán al sistema y la intensidad, se procede a aplicar agua en el punto más alto de la cuenca (según pendiente del 5%). Dentro de los primeros 17 segundos de precipitación, se logra completar la saturación del suelo, determinada por 50ml de agua del volumen total de entrada al sistema. Una vez saturado el suelo y bajo la aplicación constante de la precipitación a razón de 157ml/min, se genera el escurrimiento a los 20 segundos, dando como resultado afluencia de esorrentía sobre el cauce de escurrimiento (tazón transparente Figura 54; D).

A partir del primer ensayo el comportamiento es el mismo, ya que una vez saturado el suelo (condición expuesta en las pruebas de campo), toda la esorrentía se dirige hacia la zona de almacenamiento, sin que se logre retener más del volumen saturado en el suelo. (Figura 54; I)

Ensayo Cuenca#2 (Unidad experimental 2).

Ficha general.

- Hora de inicio: 4:05 am.
- Hora finalización: 4:39 am
- Numero de ensayos: 8 unds
- Tiempo total precipitación: 9,8 min.
- Volumen total precipitado: 1.800ml
- Área aportante: 0,13m²
- Rata de precipitación: 183ml/min.
- Intensidad: 84mm/hr
- Volumen almacenado: 100ml
- Volumen saturación suelo: 170ml
- Volumen retenido unidades hidráulicas de regulación: 1.530ml
- Tasa de retención hídrica: 309ml/m².seg (para un área de captación de $8,42 \times 10^{-3} \text{ m}^2$)



Figura 55. Unidad experimental Cuenca#2. Unidades hidráulicas de regulación. Propia (2019)

Los ensayos en la unidad experimental Cuenca #2, se realizaron bajo los mismos parámetros de precipitación (volumen) y tiempo. En este escenario se encuentran instalados tres (3) recipientes en el extremo final de la bandeja y al mismo nivel del suelo. Las tres (3) unidades hídricas suman en total un área de percolación o retención de $8,42 \times 10^{-3} \text{ m}^2$, ubicadas de forma transversal a la cuenca. Lo anterior indica que los valores de retención podrán determinarse en términos de ratas de captación con unidades hidráulicas con especificaciones de superficie y tiempo. En este caso el área ocupada por las unidades corresponde al 6,5% del área total de escurrimiento y al 67% de su sección transversal (ver Figura 55).



Figura 56. Aplicación controlada de la precipitación sobre la Cuenca#2. Propia (2019)

Al inicio del ensayo, la primera precipitación aplicada sobre la unidad experimental Cuenca#2, sirve para saturar el suelo, siendo necesarios 170 ml. Una vez completa la saturación y luego de aplicar 750ml de agua por precipitación directa sobre el área aportante a una pendiente de 5%, se logra observar que aun no llega agua al cauce de escurrimiento (tazón dispuesto para medir este volumen; Figura 58). Lo anterior muestra que las unidades hidráulicas de regulación, funcionan normalmente captando un volumen hasta el momento del ensayo indeterminado.



Figura 57. Flujo unico hacia unidades. Propia (2019)

Pasados 6 minutos y la aplicación de 1.098ml, se inicia la escorrentía hacia el cauce de escurrimiento (Figura 58), sin que se detenga la percolación hacia las unidades hidráulicas de regulación. En este instante del ensayo es posible observar las dos zonas de escurrimiento, tanto hacia las unidades hidráulicas de regulación (mayor volumen almacenado), como en el cauce de escurrimiento principal. (ver Figura 58).



Figura 58. Escurrimiento hacia las dos (2) zonas. Cauce (I) – Unidades hcas (D) Propia (2019)

Resultados de los aportes volumétricos para cada escenario.

Cuenca #1:

- Volumen aplicado precipitación: 8 descargas controladas de 225ml c/u.
- Volumen colectado en el tazón (“cauce escurrimiento”): 1.750ml.
- Volumen retenido por saturación en el suelo: 50 ml.

Cuenca #2:

- Volumen aplicado precipitación: 8 descargas controladas de 225ml c/u.
- Volumen colectado en el tazón (“cauce escurrimiento”): 100ml.
- Volumen captado por las unidades hidráulicas de regulación: 1.530ml
- Volumen atrapado en el suelo por saturación: 170 ml.



Figura 59. Recoleccion de remanentes y mediciones sobre los volúmenes obtenidos. Propia (2019)

Balance de volúmenes sin unidades hidráulicas de regulación. Cuenca #1.

- *General sin considerar consumos.*
 - Entradas (1.800ml) = Salidas (1.750ml en cauce de escurrimiento) + (50ml en saturación).
- *Entradas = salidas.*
 - $V_e (1.800ml) = V_s (1.750ml + 50 ml)$
 - $\Delta V = 0ml$
 - Volumen exorreico directo al mar: 1.750ml
- *Considerando consumo directo desde cauce de escurrimiento con base en Dh así:*
 - Domestica: Se da en base a los 320m² del área de estudio, bajo una densidad poblacional de 0,040 hab/m² y dotación de 90lts/per.día.

Así entonces $320m^2 \times 0,040hab./m^2 = 13 \text{ hab}$ (escala 1:50) = 0,25 hab = 0,94 lts/hr.

- Industrial: Se da en base al consumo por control ambiental en el Puerto de santa Marta de 6.000m² a una tasa de 4,66lts/m².día (SIG Carbosan; 2019).

Así entonces $320m^2 \times 4,66lts/m^2.día = 1.504lts/día$ (escala 1:50) = 1,25lts/hr.

- *Entradas = salidas.*
 - $V_e (1.800ml) = V_s [(Dh (416ml) + Sat. (50ml))]$
 - $\Delta V = -1.334ml$ (Volumen que se pierde al mar por condición exorreica).
 - Volumen exorreico directo al mar: 1.334ml (116,5ml/min).

Balance de volúmenes con unidades hidráulicas de regulación. Cuenca #2.

- General sin considerar consumos.
 - Entradas (1.800ml) = Salidas (1.530ml en unidades hidráulicas) + (170ml en saturación) + (100ml en cauce de escurrimiento)
- *Entradas = salidas.*
 - $V_e (1.800ml) = V_s (1.530ml + 170ml + 100ml)$
 - $\Delta V = 100ml$
 - Volumen exorreico directo al mar: 100ml (10,2ml/min)
- Considerando consumo directo desde cauce de escurrimiento:
- *Entradas = salidas.*
 - $V_e (1.800ml) = V_s [(Dh (100ml) + Sat. (170ml) + Retención (1.530ml))]$
 - $\Delta V = 0 \text{ ml}$ (Sin perdidas de volumen por consumo y retención).

Resultados

Para los ensayos en las unidades experimentales (16 en total) la demanda D_h (domestica/industrial), se tomará como constante (valor máximo) a lo largo de la precipitación y escurrimiento, registrándose estos consumos como una de las salidas del sistema.

Es necesario aclarar el papel que desempeña la demanda D_h en los ensayos, para poder entender al momento del análisis de los resultados. La demanda D_h dentro del sistema se calcula acorde a las ecuaciones presentadas en el capítulo de ensayo y resultados y en el supuesto esta D_h sería captada directamente del cauce de escurrimiento principal, representado en el modelo a escala por el “tazón transparente” (ver Figura 56). Por tal razón esta demanda D_h tendrá dos resultados, el calculado y el obtenido por aforo del “tazón”.

Por esta razón para el ensayo en la Cuenca #1 sin unidades hidráulicas de regulación, el valor aforado en el “tazón” al final del ensayo, es mayor que el calculado (que es el mismo que captaría de este recipiente), indicando precisamente lo que se quiere probar, que de todo el volumen de escurrimiento se extrae solo el D_h para el periodo de precipitación, por tanto el valor negativo al final de la ecuación no es cero y representa las pérdidas al mar por la condición exorreica de la cuenca y la incapacidad de retención de esos volúmenes.

Por otro lado para el ensayo donde se contemplan las unidades hidráulicas de regulación, el valor D_h obtenido en el aforo del “tazón” es menor al calculado para un tiempo de 9,8 minutos, esto toda vez que en el desarrollo del ensayo no se podía manipular la retención de las unidades hidráulicas de regulación, para que captaran solo el volumen remanente luego que se extrajera el volumen para cubrir la demanda calculada D_h . Por esta razón aunque las unidades hidráulicas de regulación en el ensayo y/o la extrapolación a modelos reales capten aun parte del volumen de demanda que sería extraído del cauce de escurrimiento (tazón), la ingeniería del proceso

contempla que estas unidades de regulación puedan pasar durante el tiempo de escurrimiento y por medio de un by-pass, el caudal que se requiera en ese instante para cubrir la demanda Dh.

- *Entradas = salidas.*

- $Ve (1.800ml) = Vs [(Dh (100ml) + Sat. (170ml) + Retención (1.530ml))]$
- $\Delta V = 0 \text{ ml}$ (Sin pérdidas de volumen al mar).

Por esta razón en el balance de la Cuenca #2 (ver ecuación parte superior) la demanda Dh no es la calculada (358ml) si no los 100ml que después de la retención de las unidades, fueron aforados en el tazón, toda vez que este es el balance de masas real y no el calculado.

Balance final de masas por escenarios.

Cuenca #1. Sin unidades hidráulicas de regulación.

Luego de una precipitación de 11,45 minutos, se produce para los $0,13\text{m}^2$ de área aportante un volumen neto de 1.800ml. Para cada salida de sistema, los aportes porcentuales se comportan así:

- El suelo logra retener un volumen correspondiente al 2,8% del valor total de la precipitación.
- El cauce de escurrimiento recibe por su parte el 97,2% del total de volumen precipitado.
- La captación directa desde el cauce principal para abastecer la demanda hídrica (Dh) durante el tiempo de precipitación¹ (416ml), logra captar desde el cauce de escurrimiento un volumen que representa el 23,1% de la precipitación total y el 23,8% del volumen que llega al cauce de escurrimiento (tazón).

¹ Para el caso específico de esta investigación, el tiempo de duración de la precipitación es igual al tiempo de concentración tc:

- Por su parte desde el cauce de escurrimiento hacia el mar (cauce de condición exorreica), se aporta un volumen que representa el 74,1% de la precipitación total y el 76,2% del volumen en el cauce de escurrimiento (Agua perdida al mar).

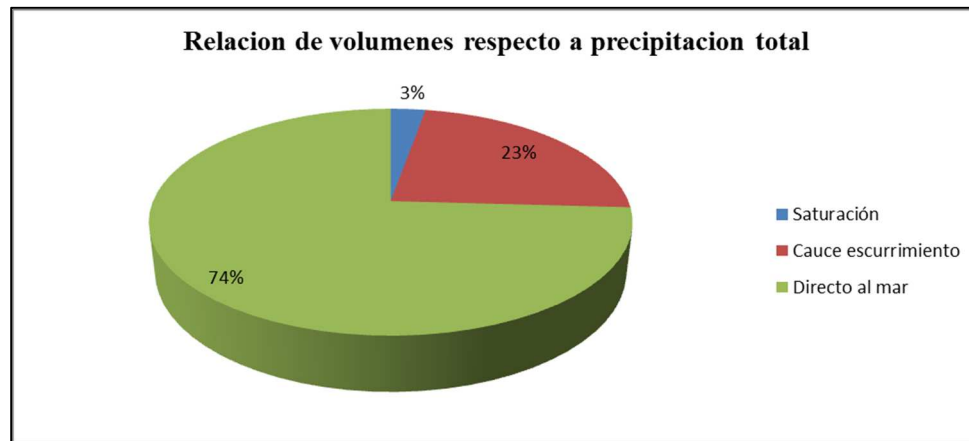


Figura 60. Grafica de aportes porcentuales de cada salida del sistema sobre la precipitación total. Propia (2019).

Cuenca #2. Unidades hidráulicas de regulación.

Luego de una precipitación de 9,8 minutos, se produce para los 0,13m² de área aportante un volumen neto de 1.800ml. Para cada salida del sistema los aportes porcentuales se comportan así:

- El suelo logra retener un volumen correspondiente al 9,4% del valor total de la precipitación.
- El cauce de escurrimiento recibe por su parte el 5,5% del total de volumen precipitado y el 6,13% del volumen luego de restar las pérdidas por saturación.
- Las unidades hidráulicas de regulación logran retener un volumen correspondiente al 85% del total de la precipitación y un 93,8% del volumen total de escurrimiento remanente luego de restar las pérdidas por saturación.

- En este ensayo la demanda D_h por “captación directa” desde el cauce de escurrimiento y durante la precipitación, tiene un valor de 358ml el cual corresponde al 19,9% del total de la precipitación y 22% luego de restar las perdidas por saturación. El cauce de escurrimientos (tazón) solo logra recibir el 6,1% de un 22% requerido para cubrir la demanda, dado que paralelo a esto las unidades hidráulicas de regulación están haciendo su trabajo mediante la retención de escorrentía. En la práctica las unidades (ubicadas en un nivel superior del cauce de escurrimiento), estarían entregando en tiempo real (durante la precipitación) y por medio de un sistema by-pass, ese 22% requerido por la demanda D_h , lo que indicaría que aunque este volumen mínimo de demanda no llegue al cauce de escurrimiento, si será cubierto desde las unidades hidráulicas de regulación. Finalmente en el balance de masas las salidas por demanda se consideran como lo requerido (358ml) y no como lo que logro llegar al cauce de escurrimiento principal (tazón: 100ml), ósea una salida del sistema por demandas D_h del 22%
- Por su parte desde el cauce de escurrimiento hacia el mar (cauce de condición exorreica), se aporta un volumen que representa el 0% de la precipitación total y el 0% del volumen en el cauce de escurrimiento, esto cuando se considera un sistema con demandas D_h .

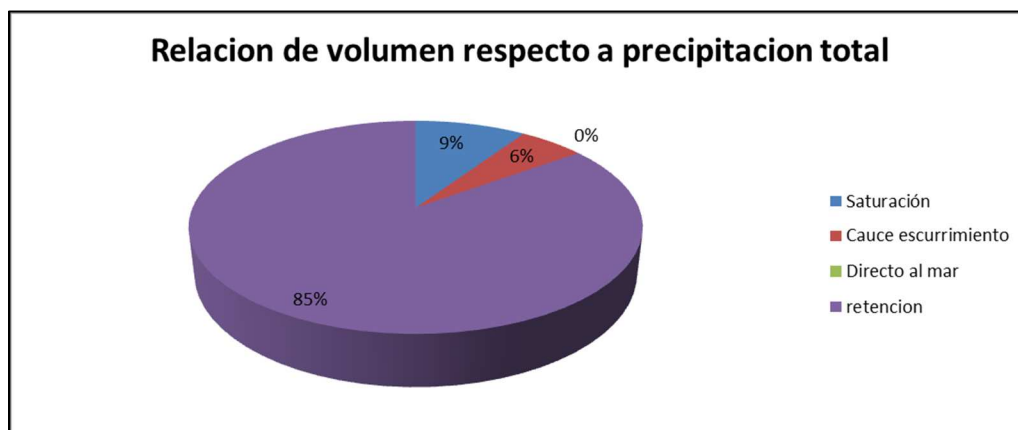


Figura 61. Garfica de aportes porcentuales de cada salia del sistema sobre la precipitacion total. Propia (2019).

Análisis de relaciones porcentuales entre “Cuencas”.

- En términos de escorrentía y potencial hídrico, la Cuenca#1 (sin unidades de regulación) presento un 77% menos de potencial de aprovechamiento.
- La diferencia entre potenciales de retención hídrica entre cuencas, es del 100% para la Cuenca #2 y de 0% para la Cuenca#1.
- Las pérdidas por condición exorreica sobre el mar, pasaron del 74,11% en la cuenca sin unidades hidráulicas de regulación, al 0% en la Cuenca#2
- La Cuenca #2 aporta durante la precipitación un 20% del volumen de escurrimiento para cubrir la demanda directa Dh (luego de saturación), y un 77% del volumen de escurrimiento es retenido para cubrir la demanda regulada Dh en un 100% post precipitación durante un tiempo “t”.

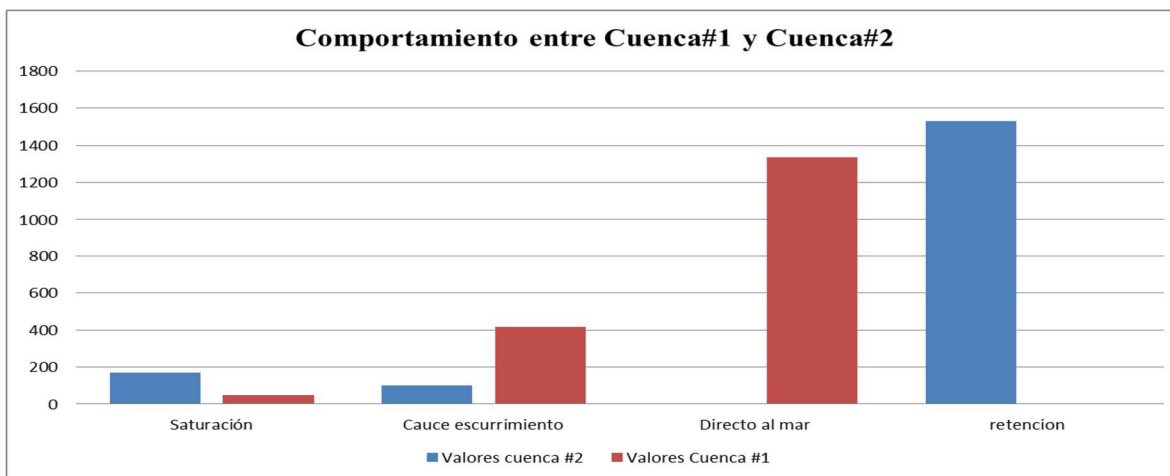


Figura 62 . Grafica de aportes en mililitros para cada salia del sistema sobre la precipitacion total. Propia (2019).

Resultados Índices Hídricos.

Para Cuenca#1 sin unidades hidráulicas de regulación y durante la precipitación.

- IUA: $(Dh/Of)*100 = 23,7\%$
- CRH: 0,0
- **IVDH: Muy Alto**

Para Cuenca#1 sin unidades hidráulicas de regulación posterior a precipitación.

- IUA: $(Dh/Of)*100 = 100\%$
- CRH: 0,0
- IVDH: Muy Alto

Para Cuenca#2. Con unidades hidráulicas de regulación y durante la precipitación.

- IUA: $(Dh/Of)*100 = 19,2\%$
- CRH: 0,85
- **IVDH: Medio**

Para Cuenca#2 con unidades hidráulicas de regulación y 15 minutos posteriores a precipitación.

- IUA: $(Dh/Of)*100 = 23,3\%$
- CRH: 0,85
- **IVDH: Medio**

De acuerdo a los resultados, es posible hallar cuatro (4) valores para cada indicador, esto de acuerdo a las condiciones particulares de los ensayos.

Análisis integrado de los Indicadores Hídricos.

Se realizará el análisis sobre los índices establecidos como variable explicativa, para Índice de Uso del Agua (IUA) y el Índice de Retención y Regulación Hídrica (IRH), derivando en una matriz de relación entre estos. Tomando en cuenta que se logró obtener datos primarios del IRH, este será calculado tomando la relación entre volúmenes de entrada y retención de la unidad experimental (retenidos específicamente por las unidades hidráulicas de regulación). Por tanto el volumen de saturación se considera como una retención, pero será restado del valor retenido, toda vez que este volumen no se consideró para validar la hipótesis.

Para la Cuenca#1.

Índice de Uso del Agua **IUA**.

Tabla 3. Variación porcentual de los rangos para el índice de Uso del Agua sin unidades.

Rango	Categoría	Significado	Condición del ensayo
23,7%	Alto	La presión de la demanda es alta con respecto a la oferta disponible	Sin unidades hidráulicas de regulación y durante la precipitación.
100%	Muy alto	La presión de la demanda es muy alta con respecto a la oferta disponible	Sin unidades hidráulicas de regulación posterior a precipitación.

Fuente: propia (2019)

Para la Cuenca#2.

Índice de Uso del Agua **IUA**.

Tabla 4. Variación porcentual de los rangos para el índice de Uso del Agua con unidades.

Rango	Categoría	Significado	Condición del ensayo
19,2%	Moderado	La presión de la demanda es moderada con respecto a la oferta disponible.	Con unidades hidráulicas de regulación y durante la precipitación.
23%	Alto	La presión de la demanda es alta con respecto a la oferta disponible.	Con unidades hidráulicas de regulación posterior a precipitación.

Fuente: propia (2019)

Para la Cuenca#1.

Índice de Retención y Regulación Hídrica **IRH**.

Tabla 5. Variación porcentual de los rangos para el índice de retención hídrica sin unidades.

*Rango	Calificación	Significado	Condición del ensayo
0%	Muy Baja	Muy baja retención y regulación de humedad.	Sin unidades hidráulicas de regulación y durante la precipitación.

*El valor del IRH, se calcula a partir del volumen retenido en el sistema, correspondiente al volumen neto captado por las unidades hidráulicas de regulación (se desprecia la saturación), en relación al volumen total precipitado.

Fuente: propia (2019)

Para la Cuenca#2.

1. Índice de Retención y Regulación Hídrica **IRH**.

Tabla 6. Variación porcentual de los rangos para el índice de retención hídrica con unidades.

*Rango	Categoría	Significado	Condición del ensayo
0,85	Muy Alta	Muy alta retención y regulación de humedad.	Con unidades hidráulicas de regulación y durante la precipitación.

*El valor del IRH, se calcula a partir del volumen retenido en el sistema, correspondiente al volumen neto captado por las unidades hidráulicas de regulación (se desprecia la saturación), en relación al volumen total precipitado.

Fuente: propia (2019)

Para la Cuenca#1.

Índice de Vulnerabilidad al Desabastecimiento Hídrico **IVDH**.

Tabla 7. Variación porcentual de los rangos para el índice de vulnerabilidad al desabastecimiento sin unidades.

Índice de Uso de Agua	Índice de Regulación	Categoría Vulnerabilidad	Condición del ensayo
Alto	Muy Baja	Muy Alto	Sin unidades hidráulicas de regulación durante precipitación.
Muy Alto	Muy Baja	Muy Alto	Sin unidades hidráulicas de regulación.

Fuente: propia (2019)

Para la Cuenca#2.

Índice de Vulnerabilidad al Desabastecimiento Hídrico **IDVH**.

Tabla 8. Variación porcentual de los rangos para el índice de vulnerabilidad al desabastecimiento con unidades.

Índice de Uso de Agua	Índice de Regulación	Categoría Vulnerabilidad	Condición del ensayo
Moderado	Muy Alta	Medio	Con unidades hidráulicas de regulación durante precipitación.
Alto	Muy Alta	Medio	Con unidades hidráulicas. (15 minutos pasada la precipitación)

*Se logra identificar una falencia en la matriz de relación para hallar el IDVH expuesta por el IDEAM, toda vez que la relación (IUA: moderado) / (IRH: Muy alta), no hace parte de esta matriz. Por tal razón se considera que en realidad el resultado en este caso para el IDVH sería “Bajo” y no “Medio”

Fuente: propia (2019)

Proyección mediante un ejercicio de simulación.

Como complemento a los ensayos realizados sobre las unidades experimentales, se plantea un ejercicio en Excel que simularía el comportamiento de un sistema (entradas y salidas), con un valor de demanda hídrica Dh calculado bajo las mismas condiciones que, en los ensayos, un valor de oferta hídrica Oh (DNP; 2017) calculado y llevado a escala 1:50, y finalmente una retención hídrica con base en un escenario donde se cuenta con unidades hidráulicas de regulación. El ejercicio muestra como partiendo de un sistema deficitario para cubrir la demanda hídrica (realidad actual en el distrito de Santa Marta), se logran disminuir estos porcentajes de desabastecimiento, desde un primer escenario que plantea la captación (hipotética) de agua desde el cauce de escurrimiento principal durante el tiempo de duración de la precipitación, logrando cubrir la demanda en porcentaje y tiempo específico. A su vez el segundo escenario muestra como con la operación de las unidades hidráulicas de regulación, se logra abastecer la demanda asociada al ejercicio, en un porcentaje menor, pero durante un periodo de tiempo mucho más prolongado. Por último, el ejercicio muestra cómo se pasa de un volumen alto de pérdidas al mar

por condición exorreica, a un volumen de cero, dentro de la misma condición exorreica, pero con una capacidad de retención mucho mayor. (ver archivo “ejercicio de simulación” digital anexo en los entregables de este estudio).

Discusión de resultados.

- La unidad experimental que contaba con unidades hidráulicas de regulación, **logra una retención final del 85%**, sobre el total del volumen de escurrimiento para la precipitación tipo especificada en los ensayos.
- Las unidades hidráulicas de regulación, para una intensidad de 84mm/hr, **son capaces de retener agua** desde la esorrentía superficial, **a una tasa de hasta 18, 5lts/m².min.** (los metros cuadrados de referencia son el área de captación de las unidades hidráulicas de regulación ubicadas de forma transversal al cauce de escurrimiento principal)
- El Índice de Vulnerabilidad al Desabastecimiento Hídrico, paso de un valor Muy Alto en la Cuenca #1, a un valor Medio en la Cuenca #2. (cuenca con unidades hidráulicas de regulación).
- Para un **área de superficie de $8,43 \times 10^{-3} \text{m}^2$** correspondiente a la ocupación de las unidades hidráulicas de regulación sobre la línea transversal del área de esorrentía, **fue posible captar hasta el 85% del volumen de escurrimiento**, para una pendiente de hasta el 5% y un margen de saturación del suelo de no más del 9,5% sobre el volumen total precipitado.

- Para cuencas exorreicas sin potencial de regulación hídrica, **las pérdidas de agua por esorrentía directa al mar** sin capacidad de aprovechamiento, se encuentran **en el orden de los 15ml/m².seg**, para una precipitación de intensidad igual a 72,5mm/hr.
- Con el uso de las unidades hidráulicas de regulación y para el escenario de ensayo (I:84mm/hr, Área: 0,13m², Duración: 9,8min, Demanda Dh: 36,5ml/min), es posible abastecer el 100% de la demanda *Dh*, con el volumen retenido luego de la precipitación, por un tiempo no mayor a 42 minutos.
- Con el uso de las unidades hidráulicas de regulación como alternativa para el aprovechamiento hídrico de esorrentías remanentes de precipitación, es posible que áreas urbanas en los últimos kilómetros de los cauces de escurrimiento principal de las cuencas asociadas, puedan captar, regular y distribuir grandes volúmenes de agua para abastecer poblaciones en los entornos de influencia y así disminuir la dependencia de los sistemas de acueducto en periodos de tiempo de medios a largos. De esta misma forma seria posible disminuir los índices de vulnerabilidad al desabastecimiento hídrico, por periodos específicos de tiempo.
- Las unidades hidráulicas de regulación, **permiten aumentar la capacidad de retención y regulación hídrica** en cuencas bajas (último tramo de los cauces principales de escurrimiento) de condición exorreica, **hasta en un 77%**, con relación a aquellas que no las tienen, disminuyendo con esto (para un IUA constante) los Índices de Vulnerabilidad al Desabastecimiento hídrico, pasando de índices “Muy Altos” a índices “Moderados” o “Bajos”.

- La variable de respuesta determinada por el Índice de Vulnerabilidad al Desabastecimiento Hídrico (IVDH), es susceptible de ser alterada por las modificaciones de tipo antrópico (Unidades Hidráulicas de Regulación) que se puedan realizar sobre la cuenca, llevando este Índice de “Muy Alto” a “Bajo”, de **acuerdo al aumento del índice de retención hasta en un 85% y la reducción del índice de uso de agua hasta en un 77%.**
- De acuerdo con los resultados de los ensayos sobre las unidades experimentales y la confrontación con la teoría en términos de oferta, demanda y regulación hídrica dentro de un sistema representado por la cuenca hidrográfica y su cauce de escurrimiento principal; **se logró establecer** por medio de datos obtenidos a partir de la experimentación, que en las cuencas de condición exorreica luego de un fenómeno de precipitación pluvial, y una vez saturado el suelo, **aportara los remanentes volumétricos de agua en forma de esorrentía hacia el cauce principal o drenajes de primer y segundo orden**, los cuales finalmente generaran un escurrimiento directo al mar. **Esta condición solo permitirá aprovechar** (además del caudal ecológico) **aquellos caudales que se pudieran captar o extraer directamente de los cauces de escurrimiento en tiempo real, para cubrir demandas específicas D_h** , y que una vez satisfecha esa demanda para el tiempo de escurrimiento, el remanente final se “perdería” en el mar, dejando la zona nuevamente en condiciones de vulnerabilidad al desabastecimiento hídrico por la poca capacidad de esta parte de la cuenca para retener agua y regularla. **Los ensayos y análisis de los resultados permitieron también establecer que en el sistema (cuenca#2) que contaba con las unidades hidráulicas de regulación, se logró disminuir los Índices de vulnerabilidad al desabastecimiento**

Hídrico, hasta niveles aceptables que disminuirían el riesgo de la población demandante del recurso hídrico.

- Se logra determinar que el Índice de Vulnerabilidad al Desabastecimiento Hídrico, como variable de respuesta para el modelo experimental realizado, es dependiente de la capacidad de regulación de la cuenca, en razón a que si se mantiene constante el Índice de Uso de Agua en su valor más alto (Caudal máximo horario o 100% de la demanda), por cada 85% del volumen que logren retener las unidades hidráulicas de regulación desde la escorrentía superficial (a una tasa de 18,3lts/m².min), la variable de respuesta (IVDH) pasara de un estado crítico (Muy Alto) a un estado estable (Medio), por un tiempo igual o menor al tiempo de precipitación más un tiempo de regulación de acuerdo a factores de oferta, demanda, porcentaje esperado de cobertura y volumen total retenido. Sin embargo, es posible llegar a coberturas del 100% hasta 24 días.
- La instalación de Unidades Hidráulicas de Regulación, en los últimos siete kilómetros de la cuenca baja del río Manzanares, **es Factible técnicamente**, toda vez que logra márgenes de hasta el 85% de retención hídrica, aportando a la disminución en los Índices de Vulnerabilidad al Desabastecimiento Hídrico, llevando la variable de respuesta (el IVDH) de un valor “Muy alto” a un valor “Medio”, toda vez que permiten captar y retener volúmenes de escorrentía que por condición exorreica se estarían perdiendo inevitablemente al mar y que son necesarios para abastecer ciertas comunidades por espacios de tiempo definidos.

Preguntas de investigación.

1. ¿Qué porcentaje sobre el desabastecimiento hídrico, aportan las pérdidas por escorrentía directa al mar en la zona adyacente al Puerto de Santa Marta?

La escorrentía directa al mar por la condición exorreica de la cuenca en la zona adyacente al Puerto de Santa Marta (4,5hectareas) y que se encuentra dentro del área que corresponde a los últimos siete kilómetros del cauce de escurrimiento principal (Rio Manzanares), **contribuye en un 90,5% sobre el desabastecimiento hídrico del área de influencia** (barrio San Martin). Esto en una precipitación de Intensidad 84mm/h, Duración 60 minutos y Demanda doméstica de 225.000L/día.

2. ¿En qué relación se debería presentar la retención hidráulica de escorrentía superficial por parte de las unidades de regulación, para abastecer el 100% de Dh durante 24 horas?

Para las mismas condiciones de la pregunta #3 (siguiente), **la relación debería estar en el orden de los 0,073 litros captados, por cada litro en el cauce de escurrimiento principal**, donde las unidades hidráulicas de regulación deberán ocupar un porcentaje mayor o igual al 67% de la sección transversal de cauce de escurrimiento principal y tener una superficie de captación no menor a 227m², lo que en términos de relación corresponde al 0,5% del área aportante. Lo anterior para lograr una retención de 4,22lts/min, luego de pérdidas por saturación del suelo). En términos de captación, **la relación para este caso específico deberá ser de 0,005m² de unidad hidráulica de regulación, por cada metro cuadrado de cuenca o área aportante y 0,67 metros lineales de unidad hidráulica, por cada metro de sección transversal de cauce de escurrimiento principal.**

3. ¿Cuánta sería la cobertura de las unidades hidráulicas de regulación en términos de porcentaje y tiempo, respecto a las demandas consideradas a partir del uso industrial en el Puerto de Santa Marta y uso doméstico en el barrio San Martin?

De acuerdo a un área de escurrimiento de 4,5 hectáreas ubicadas en los cerros de Punta Betín, para una demanda doméstica de 225.000L/día y una demanda industrial de 28.200L/día; la cobertura generada por las unidades hidráulicas de regulación con superficie neta de captación de 3.100m², ubicadas sobre el cauce de escurrimiento principal y de acuerdo a una precipitación de intensidad 84mm, duración 60minutos, saturación 9,5% y pendientes del 5%; seria de: **La cobertura sería igual al 100% de la demanda Dh, por espacio de 15 días.**

Conclusiones.

- La investigación adelantada a partir del conocimiento de los parámetros y variables más representativos del comportamiento exorreico de la cuenca baja del río manzanares y su incidencia en los índices hídricos en la ciudad de Santa Marta, durante el periodo 2018 – 2019, permitió a partir de ensayos desde una unidad experimental a escala 1:50, establecer el volumen de agua de esorrentía que potencialmente podrían retener las unidades hidráulicas de regulación, dentro de un área aportante de 320m² ubicada en los cerros de Punta Betín del Puerto de San Marta, sobre el sector más Noroccidental de la ciudad. Fue así como luego de establecer variables a partir de hechos verificables, tales como el aumento del 85% en la retención hídrica sobre el cauce de escurrimiento, una tasa de retención ideal de 18,5L/m².min y una relación optima de captación de 0,065m² de área de captación de unidades de regulación, por cada metro cuadrado de área potencial aportante, se logró establecer mediante una proyección calculada, como los 320m² de área superficial aportante, producirían un volumen total de 26.880 litros, a partir de una intensidad de 84mm/min y duración 60 minutos. **Por tanto la ubicación transversal de las unidades hidráulicas instaladas, las cuales deberán ocupar como mínimo el 67% de esta sección en el cauce de escurrimiento principal, así como una relación con el área ocupada, de 6,5% sobre el área total aportante y de acuerdo a la tasa de captación hallada a partir de modelos experimentales, estos elementos permitirían retener hasta 23.310 litros en una hora, lo que correspondería al 86% de eficacia de captación (luego de restar el volumen por saturación del 9,5%).**

- **La tasa de regulación efectiva, se logró definir en 18,5 L/m².min, luego de integrar variables obtenidas a partir de hechos verificables en las unidades experimentales.**

Es pertinente puntualizar que esta tasa se logra si solo si, con una intensidad mayor o igual a 84mm/h, una ocupación superficial de las unidades hidráulicas no menor al 6,5% del área total aportante y del 67% de la sección transversal del cauce principal de escurrimiento. Esta tasa de retención hídrica permite a su vez evitar las pérdidas al mar por condición exorreica de volúmenes necesarios de agua para abastecimiento de las poblaciones adyacentes al Puerto de Santa Marta, con pérdidas que se encuentran en el orden de 10,3 litros por cada metro cuadrado de área aportante.

- **Para los 24 kilómetros** cuadrados de área aportante de la cuenca baja del río Manzanares, en los últimos siete kilómetros (7km) del cauce de escurrimiento principal, **se podría captar un volumen total de 5.550.000 litros**, para una precipitación de intensidad mayor o igual a 84mm/hr, con duración de 60 minutos. Esta retención hídrica se lograría con la instalación de unidades hidráulicas de regulación con un área de captación no menor a 5.000m², ubicadas en la sección transversal del cauce o línea principal de escurrimiento. Este volumen **sería suficiente para abastecer 61.700 habitantes por un día completo** o la población de referencia de este estudio (**barrio San Martin**), **por espacio de 24,4 días**. Las unidades hidráulicas de regulación, **permiten aumentar la capacidad de retención y regulación hídrica** en cuencas bajas (último tramo de los cauces principales de escurrimiento) de condición exorreica, **hasta en un 77%**, con relación a aquellas que no las tienen, disminuyendo con esto (para un IUA constante) los Índices de Vulnerabilidad al Desabastecimiento hídrico, pasando de índices “Muy Altos” a índices “Moderados” o “Bajos”.

Recomendaciones.

- La administración distrital del municipio de Santa Marta, debe diseñar e instalar una batería de Unidades Hidráulicas de Regulación de forma transversal al cauce principal de escurrimiento de la cuenca baja de río Manzanares en sus últimos siete kilómetros. Las unidades se deberán diseñar a razón de 0,07 a 0,109m² de área de retención, por cada metro cuadrado de área superficial en el cauce de escurrimiento principal. Lo anterior acompañado de un análisis temporal sobre el comportamiento de la precipitación en los últimos siete kilómetros del río Manzanares, en sus 24km² de área potencial aportante, con el propósito de establecer los caudales susceptibles de aprovechamiento durante un año, evaluando así la factibilidad de construcción de unidades hidráulicas de regulación en la zona.
- La Administración Distrital, deberá adelantar programas de aprovechamiento hídrico no convencionales, a partir de fuentes de captación desde remanentes de esorrentía en cuencas bajas del departamento del Magdalena, debido a que posiblemente en estas captaciones y regulaciones no convencionales podría estar parte de la solución al problema del agua, desde un conocimiento holístico de las cuencas y los regímenes hídricos de la zona.
- Se debe revisar por parte del IDEAM la matriz de relación que permite calcular el Índice de Vulnerabilidad al Desabastecimiento Hídrico, toda vez que se logró identificar una falencia en esta matriz, toda vez que la relación Índice de Uso del Agua “moderado” e Índice de Retención Hídrica “Muy alto”, no existe actualmente en la matriz, dejando por fuera en la realidad de muchas regiones y cuencas del país (Colombia) la posibilidad de

obtener o fluctuar el Índice de Vulnerabilidad al Desabastecimiento Hídrico hasta un nivel “Bajo”, llegando este actualmente solo hasta “Medio”.

- La Corporación Autónoma Regional del Magdalena, debería tener en cuenta este trabajo de investigación, para futuras modificaciones o toma de decisiones sobre el ordenamiento de la cuenca del río Manzanares en la ciudad de Santa Marta. Así mismo la Alcaldía Distrital de Santa Marta, DADSA, Gestión del Riesgo y la Secretaría de Salud, como referencia para establecer planes de acción frente a las condiciones de desabastecimiento hídrico que sufre la ciudad de Santa Marta.

Referencias bibliográficas.

Alcaldía de Santa Marta. (2019) Geografía, ubicación geografía. Recuperado de <http://santamarta.gov.co/geografia>.

Babilonia, K. García, L. (2005) Diagnostico de las geoamenazas que afectan las cuencas hidrográficas de los ríos Gaira, Manzanares y Piedras y su incidencia en los planes de ordenamiento y manejo de cuencas (POMCA). Cartagena: Universidad de Cartagena.

Buitrago, L. et al. (2014) Guía técnica para la formulación del Plan de Ordenamiento del Recurso Hídrico. Bogotá: Minambiente - Dirección integral del recurso hídrico.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2014) Guía técnica para la formulación de los planes de ordenación y manejo de cuencas hidrográficas POMCAS. Bogotá: Minambiente.

Breña, A. Jacobo, M. (2006) Principios y fundamentos de la hidrología superficial. México: Universidad Autónoma Metropolitana.

Díaz, F. (2013) Guía para la presentación del proyecto final. Bogotá: Universidad Santo Tomas.

Decreto 1640 de 2012 [Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible]. Por medio del cual se reglamentan los instrumentos para la planificación, ordenación y manejo de cuencas hidrográficas y acuíferos, y se dictan otras disposiciones. Agosto 02 de 2012.

Decreto Ley 2811 de 1974 [Presidencia de la Republica]. Por la cual se dicta el código nacional de recursos naturales renovables y de protección del medio ambiente. Diciembre 18 de 1974.

Decreto 1449 de 1997 [Ministerio de Agricultura]. Por el cual se reglamenta parcialmente el inciso 1 del Numeral 5 del Artículo 56 de la Ley 135 de 1961 y del Decreto Ley No. 2811 de 1974. Junio 27 de 1997.

García, F. et al. (2005) Plan de manejo ambiental para la recepción, manejo, acopio y embarque directo del carbón en el terminal Marítimo de Santa Marta. Santa Marta: Carbosan LTDA

Gómez, S. (2012) Metodología de la investigación. México: Red Tercer Milenio.

Gutiérrez, H. De la vara, R. (2012) Análisis y diseño de experimentos 3ra edición. México: Mc Graw Hill.

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (2014) Estudio Nacional del Agua [ENA, 2014]. Bogotá: IDEAM, MINAMBIENTE.

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (2010) Estudio Nacional del Agua [ENA, 2010]. Bogotá: IDEAM, MINAMBIENTE.

Lux, B. (2016) Conceptos básicos de morfometría de cuencas hidrográficas. Guatemala: Universidad San Carlos de Guatemala.

Política Nacional para la Gestión integral del Recurso Hídrico. [Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo territorial]. Marzo de 2010.

Puppo, L.(2018) Necesidades de agua en parques y jardines. Recuperado de <http://fagro.edu.uy/>

Ramírez, E. (2018) Introducción a la Psicología. Recuperado de <http://4ujaen.es/eramirez/>

Rangel, L. (2018) Monitoreo de la flora y fauna presente en los cerros punta Betín periodo lluvioso 2018. Santa Marta: Conambiente S.A.S

Resolución 1907 de 2013 [Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible]. Por la cual se expide la guía técnica para la formulación de los planes de ordenación y manejo de cuencas hidrográficas. Diciembre 27 de 2013.

Resolución 865 de 2004. [Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo territorial]. Por el cual se adopta la metodología para el cálculo del índice de escasez para aguas superficiales a que se refiere el Decreto 155 de 2004 y se adoptan otras disposiciones. Julio 22 de 2004.

Resolución 0330 de 2017. [Ministerio de Ambiente, Ciudad y Territorio]. Por la cual se adopta el Reglamento Técnico para el Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico – RAS y se derogan las resoluciones 1096 de 2000, 0424 de 2001, 0668 de 2003, 1459 de 2005, 1447 de 2005 y 2320 de 2009. Junio 08 de 2017.

Resolución 0509 de 2013. [Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible]. Por la cual se definen los lineamientos para la conformación de los consejos de cuenca y su participación en las fases del plan de ordenación de cuenca y se dictan otras disposiciones. Marzo de 2010.

Romero, J. (2002) Purificación del agua. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería.

Rosales, E. (2018) Como hacer pruebas de infiltración, artículo técnico. Recuperado de <http://cfia.or.cr/>

Sánchez, F. (2012) Unidad 3: Evaporación y evapotranspiración. Recuperado de <http://hidrología.usal.es/>

Universidad Nacional del centro de la provincia de Buenos Aires. (2019) El ciclo hidrológico. Recuperado de <http://user.exa.unicen.edu.ar/>