

# DOCUMENTO TÉCNICO MUNICIPAL

---

## BARRANQUILLA, ATLÁNTICO



**Superservicios**  
Superintendencia de Servicios  
Públicos Domiciliarios



# DOCUMENTO TÉCNICO MUNICIPAL

---

## BARRANQUILLA, ATLÁNTICO

### CAMACOL

*Nicolás Sebastián Buitrago Vargas  
Andrés Camilo Cortes Gómez  
Carolina Cardona Londoño  
Paula Alexandra Peñuela Rincón  
Luz Adriana Rodríguez Padilla*

### SUPERSERVICIOS

*Karen Bustos Pineda  
Jorge Moisés Martelo Payares  
Eliana Alejandra Páez Lugo  
María del Pilar Sánchez Buitrago  
Mónica Tatiana Gómez Vargas  
Diego Antonio Copete*



**Superservicios**  
Superintendencia de Servicios  
Públicos Domiciliarios





## Tabla de contenidos

Glosario de siglas .....	3
Listado de tablas .....	3
Listado de gráficas.....	3
Listado de mapas .....	4
1. Introducción .....	5
2. Generación de vivienda nueva .....	5
2.1. Tendencia de ventas en la última década .....	6
2.2. Factor demográficos .....	7
2.3. Proyectos estratégicos.....	7
3. Prestación de servicio de agua y alcantarillado .....	9
3.1. Sistemas de acueducto y alcantarillado .....	9
3.2. Oferta de los servicios públicos de acueducto y alcantarillado.....	11
3.3. Pérdidas de agua .....	13
4. Proyección demanda de agua y capacidades de la oferta .....	14
4.1. Postulados básicos.....	14
4.2. Proyección de entrega de viviendas .....	15
4.3. Crecimiento inercial de la demanda de agua .....	17
4.4. Planificación de obras.....	18
4.5. Ubicación proyectos estratégicos y áreas de prestación de servicio .....	19
4.6. Balance oferta y demanda.....	20
5. Conclusiones.....	22
6. Bibliografía .....	24
Anexo 1. Modelos de proyección de demanda.....	26
A1. Filtro de Kalman.....	26
A2. Spline .....	26
A3. Stine.....	27
A4. Correlación lineal.....	27
A5. Función logística .....	28

## Glosario de siglas

- APS: Área de Prestación del Servicio
- Camacol: Cámara Colombiana de la Construcción
- CAA: Corporación Autónoma Regional del Atlántico
- CRA: Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico
- CCP: del inglés Concrete Cylinder Pipe
- DANE: Departamento Administrativo Nacional de Estadística
- DNP: Departamento Nacional de Planeación
- EDAR: Estación Depuradora de Agua Residual
- IANC: Índice de agua no contabilizada
- IUS: Indicador Único Sectorial
- ND: No Disponible
- NEP: Nueva Política Económica
- PEC: Plan de Emergencia y Contingencias
- POT: Plan de Ordenamiento Territorial
- PSMV: Plan de Saneamiento y Manejo de Vertimientos
- RAS: Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico
- TRIPLE A: Sociedad de Acueducto, Alcantarillado y Aseo de Barranquilla S.A. E.S.P.
- SIVICAP: Sistema de Información para Vigilancia de la Calidad del Agua Potable
- SSPD: Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios
- SUI: Sistema Único de Información

## Listado de tablas

- Tabla 1. Resumen de los indicadores de agua potable y saneamiento básico
- Tabla 2. Resultados Indicador Único Sectorial (IUS) 2020 – 2021

## Listado de gráficas

- Gráfica 1. Ventas netas de vivienda en Atlántico
- Gráfica 2. Ventas netas de vivienda según proyectos estratégicos en Barranquilla
- Gráfica 3. Ventas netas de vivienda y formación de hogares
- Gráfica 4. Metas de vivienda en proyectos estratégicos
- Gráfica 5. Estimación de entrega de viviendas en Barranquilla
- Gráfica 6. Caudal (L/s) según modelos de proyección de demanda base
- Gráfica 7. Oferta y demanda de caudal (L/s) – escenario 1
- Gráfica 8. Oferta y demanda de caudal (L/s) – escenario 2

## Listado de mapas

- Mapa 1. Proyectos estratégicos
- Mapa 2. Área de prestación de servicios
- Mapa 3. Áreas de prestación de servicios y proyectos estratégicos

## 1. Introducción

El documento técnico del municipio de Barranquilla, Atlántico, se constituye como el informe de resultados de los análisis llevados a cabo en el “*Estudio sectorial piloto sobre la prestación oportuna y eficiente de servicios públicos domiciliarios de acueducto y alcantarillado en proyectos estratégicos de vivienda*”. En el cual se estableció como objetivo la evaluación de los indicadores de gestión, parámetros operativos generales, prospectiva de la demanda, y la identificación de limitaciones en la prestación del servicio. La prestación del servicio está actualmente a cargo de la Sociedad de Acueducto, Alcantarillado y Aseo de Barranquilla S.A. E.S.P. - TRIPLE A.

La estructura del documento incorpora el desarrollo y análisis de los siguientes componentes:

- Generación de vivienda nueva y la relevancia de proyectos estratégicos (planes parciales o macroproyectos) en la solución de las necesidades habitacionales.
- Caracterización de la prestación de los servicios de acueducto y alcantarillado en el municipio.
- Ejercicios de proyección de la demanda y oferta de los servicios públicos, tomando en consideración los proyectos estratégicos de vivienda, y las perspectivas en la prestación de los servicios.
- Evaluación de las capacidades de prestación, su correspondencia con la demanda de servicios de acueducto y alcantarillado, y las correspondientes reflexiones.

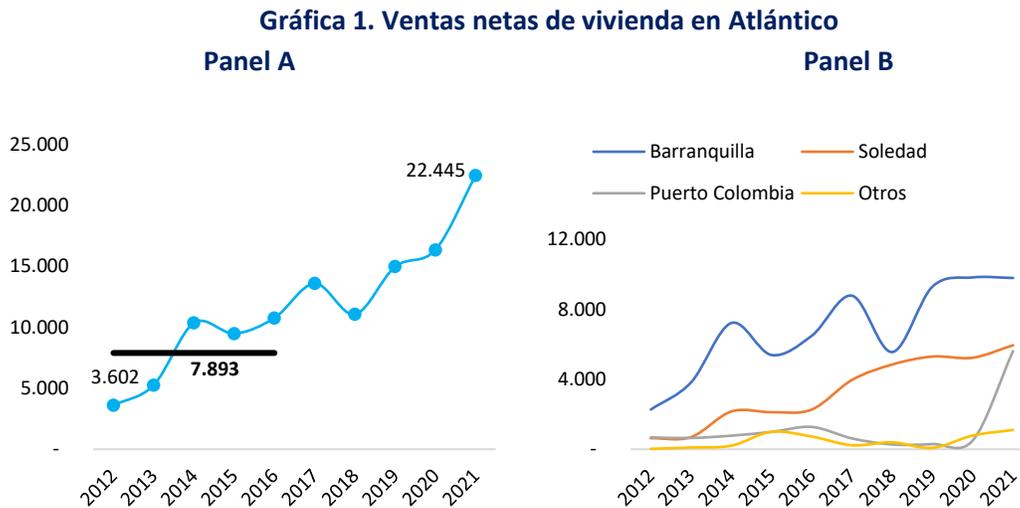
## 2. Generación de vivienda nueva

En esta sección se estudiará la dinámica de generación de vivienda en la última década en el municipio de Barranquilla, Atlántico, así como su potencial de generación en los próximos años. Para ello se analizará el volumen de las ventas de vivienda nueva medido por Coordenada Urbana (Camacol, 2022), la formación esperada de hogares en los próximos años mediante proyecciones del Departamento Administrativo Nacional de Estadística - DANE (2022b), y las metas de vivienda de proyectos estratégicos identificados por el Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio - Minvivienda.

Este análisis se soporta en la definición de aglomeraciones urbanas de la Misión del Sistema de Ciudades del Departamento Nacional de Planeación - DNP (2014), reconociendo que la generación de vivienda al interior de un municipio no solo depende de sus condiciones propias, sino también de la interconexión funcional con municipios relativamente cercanos. De igual forma, se entiende que los proyectos estratégicos impactan de manera importante en el número de viviendas que se generarán en los próximos años por varios factores, a saber: por su tamaño, ejecución en el tiempo y relevancia en la planeación del crecimiento de las ciudades.

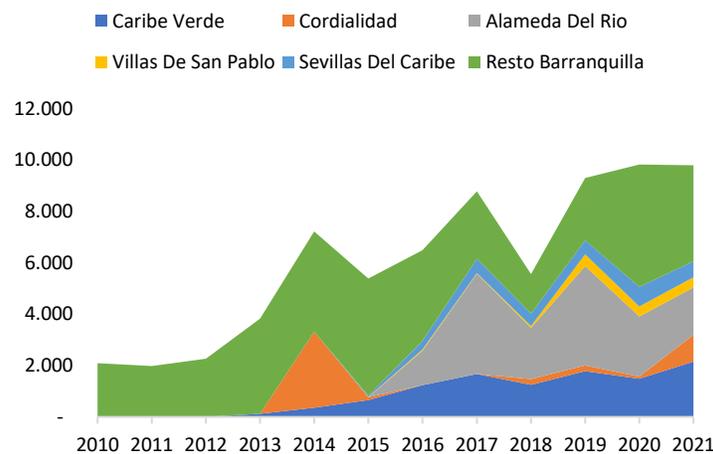
## 2.1. Tendencia de ventas en la última década

La generación de vivienda en el Atlántico se ha multiplicado casi por cinco en la última década (gráfica 1 – panel A). Barranquilla como nodo principal de la aglomeración es uno de los municipios del país que explican este cambio seguido por Soledad y Puerto Colombia. Entre 2012 y 2015 se comercializaban un promedio de 4.600 unidades anuales y para el periodo 2016 - 2020 el promedio llegó casi a duplicarse (7.986 unidades al año). Ya para 2021 las ventas se ubicaron por encima de las 9.700 unidades (gráfica 1 – panel B). Así pues, esta ciudad es la primera en volumen de ventas dentro de su aglomeración definida por el Sistema de Ciudades.



Fuente: Coordinada Urbana – Cálculos Camacol y SSPD  
Nota: Otros se refiere a Galapa, Malambo y Tubará

## Gráfica 2. Ventas netas de vivienda según proyectos estratégicos en Barranquilla



Fuente: Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio y Coordinada Urbana – Cálculos Camacol y SSPD

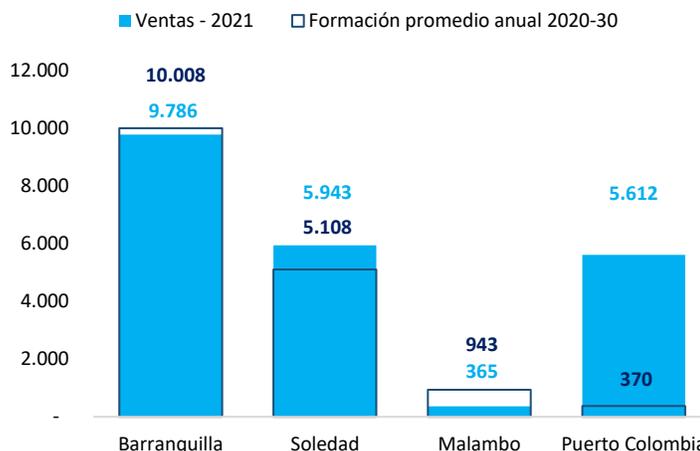
Desde el año 2013 buena parte de las ventas en el municipio se deben cinco a los planes parciales que se desarrollan allí (ver gráfica 2), los cuales desde ese año han vendido 35.380 viviendas. Para el año 2021 las ventas en proyectos estratégicos representaron el 62% de las ventas en el municipio. La relevancia de estos proyectos estratégicos se mantendrá en los próximos años, pues la meta de generación de vivienda de estos es de cerca de 99 mil unidades (gráfica 4 de la sección 2.3.).

## 2.2. Factores demográficos

Uno de los principales determinantes en la demanda de mediano y largo plazo de vivienda nueva es el crecimiento demográfico (Megbolugbe *et al.*, 1991). Cada hogar requiere de un espacio en el cual pueda habitar y convivir con los suyos, de esta manera, la formación esperada de hogares es una señal fundamental para entender las necesidades y generación de vivienda.

La gráfica 3 contrasta las ventas de vivienda nueva en el último año con la formación anual promedio de hogares esperada entre 2020 y 2030. Se puede observar que para la ciudad de Barranquilla se registra ventas de vivienda nueva a 2021 de similar magnitud a lo que se estima será la formación de hogares en los próximos años. Una lectura similar se tiene para el municipio de Soledad. Por su parte, en Puerto Colombia se presentan ventas superiores a la formación de hogares esperada.

**Gráfica 3. Ventas netas de vivienda y formación de hogares**



Fuente: DANE y Coordinada Urbana – Cálculos Camacol y SSPD

## 2.3. Proyectos estratégicos

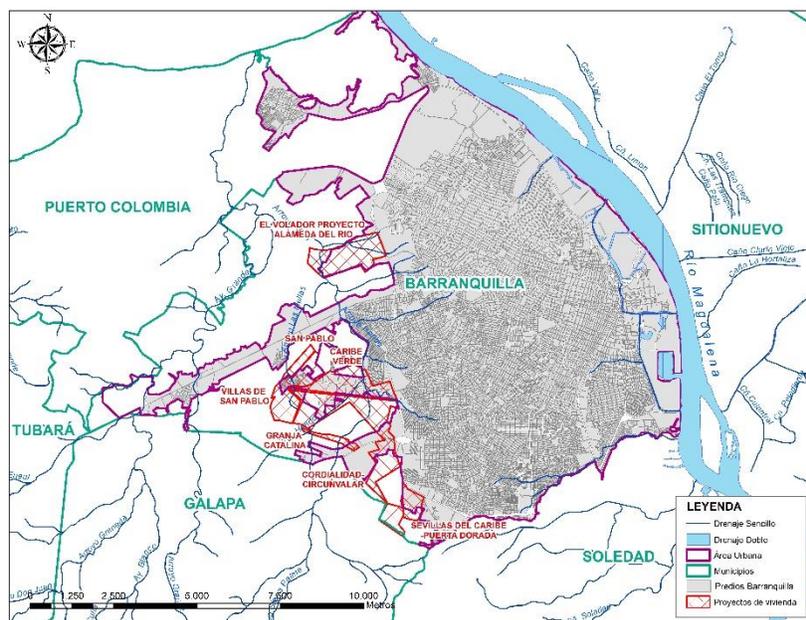
Los proyectos estratégicos de vivienda, planes parciales y macroproyectos, además de ser un mecanismo ideal de gestión y planeación del crecimiento de las ciudades, brindan información del potencial de generación de vivienda más allá de la dinámica general reciente de la comercialización y la proyección de formación de hogares.

Los planes parciales son instrumentos que desarrollan o complementan disposiciones de los Planes de Ordenamiento Territorial - POT en áreas de suelo urbano o de expansión urbana; allí se establecen lineamientos de edificabilidad, equipamientos, servicios públicos entre otros, en proyectos de urbanización y construcción (Función pública, 2015). De forma similar, los macroproyectos son actuaciones urbanísticas en común acuerdo entre el gobierno nacional y las administraciones municipales y distritales que tienen como objetivo habilitar suelo para la construcción de vivienda (Función pública, 2011).

Por su gran tamaño la ejecución de estos suele sobrepasar los ocho años (Minvivienda, 2021) y a su vez se componen de varios proyectos de propiedad horizontal de un tamaño relativamente menor. A medida que estos proyectos, de menor tamaño, se comercializan y entregan, al interior del proyecto estratégico aparecen nuevos proyectos hasta que se completa la meta de generación de vivienda.

Como se mencionó en la sección 2.1., actualmente en Barranquilla se identifican cinco planes parciales que aportaron en 2021 el 61% del total de las unidades comercializadas en el municipio. Igualmente, en la ciudad hay dos planes parciales adicionales (Granja Catalina y San Pablo) que se encuentran por el momento inactivos, es decir, no se ha detectado aún actividad comercial (lanzamientos de vivienda) en ellos. La ubicación de estos proyectos y su extensión se puede ver en el mapa 1.

**Mapa 1. Proyectos estratégicos**

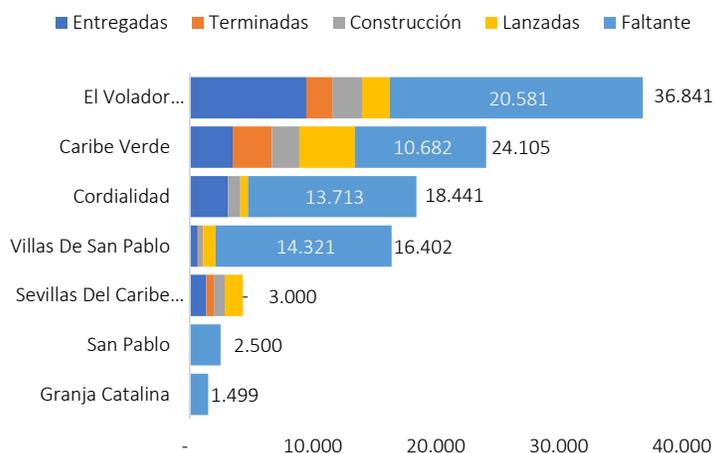


Fuente: Minvivienda – Elaboración Camacol y SSPD

En la gráfica 4 se descompone las unidades de vivienda que los proyectos tienen como meta según su estado. Se observa como para los planes parciales El Volador - Alameda del Río, Caribe Verde,

Cordialidad y Villas de San Pablo les falta la mayor parte de sus unidades por desarrollar, 62% del total de la meta. Es decir, aún queda pendiente que nuevos proyectos (de menor tamaño) lancen al mercado unidades de vivienda, que posteriormente, después de su comercialización y construcción, serán entregadas. De esta forma, los proyectos estratégicos en el municipio tienen un potencial de desarrollar 59.297 unidades en los próximos años, a las cuales se agregarían 3.999 unidades de los proyectos San Pablo y Granja Catalina que aún no están activos.

**Gráfica 4. Metas de vivienda en proyectos estratégicos**



Fuente: Minvivienda y Coordinada Urbana – Cálculos Camacol y SSPD

### 3. Prestación de servicio de agua y alcantarillado

En esta sección se aborda una descripción de la prestación de los servicios públicos de acueducto y alcantarillado que operan en el municipio de Barranquilla, y las condiciones técnicas que describen los sistemas de potabilización y tratamiento de aguas residuales. Así mismo, son descritas las coberturas en áreas de prestación de los servicios y las condiciones de la oferta de los servicios en términos de los principales indicadores regulatorios definidos por la legislación vigente aplicable.

#### 3.1. Sistemas de acueducto y alcantarillado

Con base en la información reportada en el Plan de Emergencia y Contingencias - PEC del prestador, el sistema de acueducto de la empresa TRIPLE A capta sus aguas del río Magdalena, mediante un sistema de captación que consta de una dársena, un canal de aducción y dos estaciones de bombeo de baja presión.

La dársena tiene un área de 22.000 m<sup>2</sup>, en su orilla se encuentra ubicada la estación de bombeo de baja presión No.2, la cual abastece las plantas de tratamiento 2, 4 y 5. De la dársena se deriva un canal de aducción que termina en dos pozos de succión intercomunicados entre sí y ubicados en la

estación de baja presión No.1. Esta última alimenta de manera regular las plantas de tratamiento 1 y 3, aunque también tiene conexión a las plantas 2 y 4.

Para conducir el agua cruda desde la estación de baja presión No.1 hasta las plantas de tratamiento 1, 2, 3, y 4, hay una tubería de hierro fundido de 30" que alimenta planta 1, las demás tuberías son de tipo Concrete Cylinder Pipe - CCP, construidas en acero revestido con concreto o mortero de cemento y reforzadas helicoidalmente con varilla de acero al carbón y recubiertos con mortero de cemento denso.

Estas tuberías son de 36" que alimenta planta 2, de 42" que abastece planta 3 y una de 42" la planta 4, esta última tiene un ramal de 36" de diámetro que se conecta con la tubería de 36" que alimenta planta 2. Las tuberías se encuentran interconectadas y cuentan con válvulas a la llegada de las plantas, las cuales se utilizan para la regulación de los caudales.

Para conducir el agua cruda desde la estación baja presión No.2 hasta la planta 5 existen dos tuberías tipo CCP de 42"; una de estas tuberías posee una conexión con la tubería de 36" que alimenta planta 4, desde la cual es abastecida regularmente.

El sistema de alcantarillado por su parte recoge las aguas residuales de 318.901 suscriptores. Se encuentra diseñado para el transporte de aguas residuales domésticas e industriales y trabaja por gravedad. En las zonas donde no se puede trabajar por gravedad, se utilizan estaciones de bombeo o elevadoras, para llevar las aguas residuales, hasta un sistema de colector, sistema de tratamiento o cuerpo receptor.

El sistema de recolección, transporte, disposición y tratamiento de aguas residuales de Barranquilla se encuentra dividida topográficamente en dos grandes vertientes: la vertiente oriental y la vertiente occidental. Mediante el sistema de pretratamiento "Barranquillita", se trata la totalidad de las aguas residuales generadas en la zona oriental de Barranquilla al año 2030 con un caudal de diseño de 4,3 m<sup>3</sup>/s. Las operaciones asociadas a este sistema de pretratamiento incluyen:

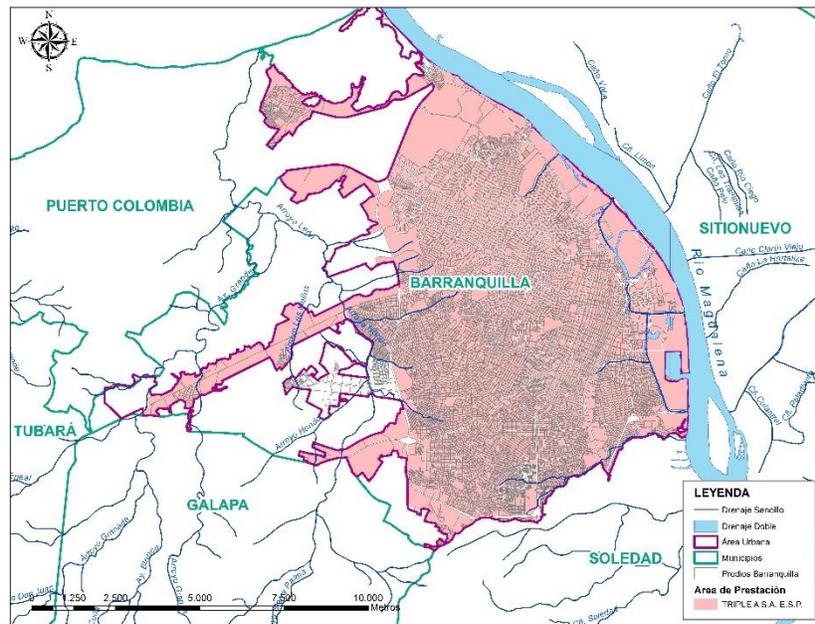
- Desbaste grueso conformado por 3 rejas donde la separación de los barrotes de la reja es de 80 mm.
- Desbaste medio está conformado por 3 rejas donde la separación de los barrotes de la reja es de 19 mm.
- Desbaste fino conformado por 4 micro tamices rotativos con rejillas en acero inoxidable donde la abertura de separación de la reja es de 1,5 mm.

Las aguas pretratadas son conducidas desde la estación de pretratamiento hasta el emisario subfluvial de diámetro 2.000 mm.

El sistema de alcantarillado de la TRIPLE A cuenta con la Estación Depuradora de Agua Residual - EDAR "El Pueblo". Esta dispone de operaciones de desbaste y desarenación que posteriormente conducen el agua residual a un tratamiento biológico conformado por varios módulos de lagunas de estabilización que integran lagunas facultativas, anaerobias, anóxicas, aerobias y de sedimentación.

El mapa 2 ilustra el área de prestación de los servicios de acueducto y alcantarillado a cargo del operador, en el municipio de Barranquilla:

**Mapa 2. Área de prestación de servicios**



Fuente: Elaboración Camacol y SSPD

### 3.2. Oferta de los servicios públicos de acueducto y alcantarillado

Según el PEC – 2021, la fuente de abastecimiento es el río Magdalena el cual vierte en promedio 7.000 m<sup>3</sup>/s en el Mar Caribe. El referido documento indica que se presenta alta vulnerabilidad por inundación, consecuencia del incremento en los niveles del río Magdalena. Sin embargo, TRIPLE A dispone de mecanismos de evacuación por bombeo y medios alternos de abastecimiento, como acciones de respuesta frente a acciones de inundaciones en las zonas de bombes o sistemas de captación de agua potable.

En lo que corresponde a la cantidad de agua disponible y autorizada por la autoridad ambiental<sup>1</sup>, Corporación Autónoma Regional del Atlántico - CAA, la empresa TRIPLE A dispone actualmente de una concesión de aguas superficiales provenientes del río Magdalena con un caudal de 10.000 L/s,

<sup>1</sup> Resolución CRA 969 de 2019

equivalentes a un volumen total de 864.000 m<sup>3</sup>/día con una frecuencia de 24 horas/día durante 30 días/mes, hasta el año 2025.

Para los efectos de este estudio se presume que la concesión de aguas será renovada una vez se cumpla el periodo autorizado, con un caudal por lo menos igual al que se encuentra otorgado. El análisis de la oferta hídrica otorgada frente a la proyección de la demanda futura, se indica en la sección 4.6.

Respecto al permiso de vertimientos de aguas residuales, TRIPLE A no reporta al Sistema Único de Información - SUI este documento actualizado. No obstante, el prestador cuenta con un Plan de Saneamiento y Manejo de Vertimientos – PSMV, este aprobado por la Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico - CRA con vigencia de 10 años<sup>2</sup>. En consecuencia, se presentan restricciones normativas ambientales para los vertimientos de aguas residuales, entre tanto el prestador no actualice los respectivos permisos ambientales ante la autoridad competente.

Los indicadores de desempeño de la prestación del servicio público son construidos con base en la información del SUI, PEC, Sistema de Información para Vigilancia de la Calidad del Agua Potable - SIVICAP, y visitas de vigilancia adelantadas por la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios - SSPD.

La siguiente tabla presenta el resumen de los indicadores y su referente regulatorio o reglamentario.

**Tabla 1. Resumen de los indicadores de agua potable y saneamiento básico**

Indicador	Valor vigencia del Área de Prestación de Servicio - APS	Unidades	Valor del referente de regulación	Fuente de información
Índice de Riesgo de Calidad del Agua -IRCA	0	%	0,0 a 5,0	SIVICAP
Nivel de Riesgo Calidad del Agua	Sin riesgo	NA	Sin Riesgo	SIVICAP
Continuidad	23,93	hr/día	21,1 – 24 (Continuo)	Bases Informe Sectorial 2020
Índice de Agua No Contabilizada - IANC	54,7	%	25	Bases Informe Sectorial 2020
Índice de Pérdidas por Suscriptor Facturado - IPUF	28,7	m <sup>3</sup> /susc-mes	6,0	Bases Informe Sectorial 2020
Cobertura acueducto	99,97	%	100	Bases Informe Sectorial 2020
Cobertura alcantarillado	97,04	%	100	Bases Informe Sectorial 2020
Capacidad instalada de tratamiento de Aguas Residuales	5.398	L/s	NA	SUI – Registro de Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales

<sup>2</sup> Resolución C.R.A 580 de 2017

Capacidad instalada de potabilización.	7.500	L/s	NA	SUI – Registro de Sistemas de Potabilización
Suscriptores acueducto	322.826	NA	NA	Bases Informe Sectorial 2020
Suscriptores alcantarillado	318.901	NA	NA	Bases Informe Sectorial 2020

Fuente: SUI – SSPD – PEC TRIPLE A 2021 – SIVICAP.

Teniendo en cuenta el desempeño de los diferentes indicadores y estándares de prestación de servicios se incorpora, mediante la Resolución CRA 906 de 2019, el Indicador Único Sectorial - IUS, el cual permite estimar el nivel de riesgo de la prestación de los servicios públicos de acueducto y alcantarillado por parte de los prestadores, integrando ocho dimensiones temáticas, que ponderadas permiten calificar el indicador con un dato para cada vigencia. Una vez consultado el reporte del IUS, se identifica para la empresa TRIPLE A un nivel de riesgo “bajo” para 2020 y 2021. El detalle de estos resultados se presenta a continuación.

**Tabla 2. Resultados Indicador Único Sectorial (IUS) 2020 – 2021:**

Dimensiones	2020		2021	
	Puntuación ponderada	Porcentaje de cumplimiento	Puntuación ponderada	Porcentaje de cumplimiento
1. Calidad del Servicio (CS)	12,48	99,80	12,46	99,68
2. Eficiencia en la Planificación y ejecución de inversiones (EP)	11,05	88,40	12,50	100,00
3. Eficiencia en la Operación (EO)	11,26	90,04	10,85	86,80
4. Eficiencia en la Gestión Empresarial (GE)	12,50	100,00	12,50	100,00
5. Sostenibilidad Financiera (SF)	7,43	59,41	7,70	61,60
6. Gobierno y Transparencia (GYT)	12,50	100,00	12,09	96,72
7. Sostenibilidad Ambiental (SA)	12,38	99,04	11,25	90,00
8. Gestión Tarifaria (GT)	12,47	99,76	11,16	89,28
IUS	92,06%		90,51%	
NIVEL DE RIESGO	Riesgo Bajo		Riesgo Bajo	

Fuente: SSPD (2021c) – Elaboración Camacol y SSPD

### 3.3. Pérdidas de agua

Los volúmenes de agua que se pierden, así como el ahorro en el uso del agua por parte de los usuarios permite aliviar la presión sobre la disponibilidad del recurso hídrico y la producción de agua potable, por lo cual es importante observar el comportamiento del IANC, en el análisis de la demanda de agua actual y futura.

Con base en las consultas realizadas al sistema SUI, se evidencia un volumen de producción anual de 152.584.806 (m<sup>3</sup>/año) para el año 2020. Comparando este valor con el volumen facturado reportado a SUI para la misma vigencia, se estimó un volumen de agua pérdida equivalente a 83.429.530 metros cúbicos al año, lo cual, en términos de este indicador, resultó un valor de IANC de 54,7%.

El valor de pérdidas del artículo 44 de la Resolución 0330 de 2017, Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico - RAS, establece un valor máximo de pérdidas técnicas del 25% para el cálculo de las dotaciones y determinación de la demanda de un sistema de abastecimiento. Teniendo en consideración que el valor estimado para TRIPLE A resulta ser mayor que el máximo permitido por la reglamentación técnica. Para efecto de la proyección de la demanda de agua futura, se tomó el valor de IANC del 54,7% como constante en el periodo de análisis 2013 – 2030 (ver sección 4.1.).

Por su parte, las pérdidas de agua potable en términos del indicador Índice de Pérdidas por Suscriptor Facturado -IPUF- fueron estimadas en un orden de 28,7 m<sup>3</sup>/suscriptor-mes. Adicionalmente, es importante indicar que la reducción de los niveles de pérdidas y límites mínimos proyectados, estarán sujetos al estudio del Nivel Económico de Pérdidas - NEP, propio de cada prestador, según lo establecido por la Resolución CRA 906 de 2019.

## 4. Proyección demanda de agua y capacidades de la oferta

En esta sección se realizarán los cálculos de proyección en demanda de agua con un horizonte de tiempo a 2038 y se compararán con las capacidades proyectadas de los prestadores del servicio en el municipio.

### 4.1. Postulados básicos

Las siguientes consideraciones se tomaron como postulados básicos para el desarrollo del presente estudio:

- a. La población de análisis se acotó al área de prestación de los servicios de acueducto y alcantarillado atendidos por TRIPLE A, correspondientes al área urbana del municipio de Barranquilla.
- b. El APS está constituida por suscriptores residenciales y no residenciales.
- c. Información de oferta hídrica establecida según concesiones de agua otorgada por la CAA.
- d. El caudal concesionado determina las limitaciones de oferta de agua potable.
- e. Tendencias de crecimiento de suscriptores y comportamiento de consumos de agua potable según reportes realizados por el prestador al sistema SUI (2022).
- f. La unidad temporal de análisis es anual.
- g. El periodo de análisis comprende los años 2013 - 2020, y se hicieron proyecciones al 2038.
- h. El corto plazo se establece como un periodo menor a 5 años y el mediano plazo, como un periodo comprendido entre 5 y 10 años.
- i. Un suscriptor residencial es equivalente a una vivienda.
- j. En cada vivienda nueva habita solamente un hogar.
- k. Se tiene en cuenta las proyecciones de hogares y personas de la cabecera del municipio (DANE, 2022a, 2022b) para calcular el tamaño promedio de los hogares, personas por hogar, para cada año hasta 2035. Después de ese año se asume que el tamaño del hogar permanece igual al de 2035.

- l. Las viviendas que se estima se generarán en el municipio estarán ocupadas desde el momento que se entregan.
- m. La población municipal tiende a ser mayor a la población atendida por prestadores de servicios públicos de acueducto y alcantarillado; por ende, no se asume cobertura de 100% en la prestación de estos servicios.

Tomando en consideración el RAS en su título sobre sistemas de acueducto, se puede estimar el caudal demandado en función de la población (Minvivienda, 2010):

$$Demanda(L/s) = Población \left( \frac{Dotación_{RAS}}{86400} \right) (1 + \%Perdidas\ agua) \quad [1]$$

La *Dotación RAS* depende de la altura respecto al nivel del mar del municipio, a menor altura mayor *Dotación*. Los valores de *Dotación* para distintas alturas están definidos por la resolución 0330 de 2017 (Minsalud, 2017). Teniendo en cuenta los postulados *i.*, *j.* y *k.*, se puede deducir fácilmente la demanda de agua expresada en caudal (L/s) en función ya sea suscriptores o viviendas.

## 4.2. Proyección de entrega de viviendas

Para la proyección de vivienda, la estimación de la entrada (entregas) de vivienda nueva al municipio se ha dividido en dos partes: por un lado, se tienen en cuenta los proyectos que, en el momento del análisis, se encuentran en preventa, construcción o terminado (sin entregar), ya sea al interior de proyectos estratégicos (gráfica 4 de la sección 2.3.) o fuera de ellos (resto). Por el otro, se realizaron estimaciones sobre la generación de vivienda nueva, es decir, lanzamientos supuestos de proyectos que se realizaran en los próximos años, nuevamente, dentro o fuera de los proyectos estratégicos.

La estimación de entregas en los proyectos de vivienda ya lanzados en el municipio tiene en cuenta que estos se encuentran en diferentes fases constructivas: sin iniciar construcción (preventa), cimentación, estructura, obra negra, acabados o terminado. Considerando la fase constructiva y el tiempo que tarda<sup>3</sup> cada fase hasta la entrega se estima el año de entrega de las viviendas. Los tiempos que se usan son los calculados para viviendas de interés social<sup>4</sup>, pues este tipo de vivienda tiene una mayor participación en los proyectos estratégicos. En los últimos meses se evidencia que este tipo de vivienda tiene una duración promedio de 31 meses desde su lanzamiento hasta la entrega y de unos 16 meses en todo su estado constructivo.

La estimación de entregas de viviendas en los próximos años no solo dependerá de los proyectos que hoy ya están en el mercado, sino también de los que lo estarán en los próximos años. Se plantea entonces supuestos de generación de nuevos proyectos o lanzamientos de vivienda para los próximos años y a estos se les aplica el tiempo entre el lanzamiento y la entrega. Dicha estimación

<sup>3</sup> Ejemplos de estos tiempos (calculados con información previa a la usada en este estudio) se pueden ver en Camacol (2019).

<sup>4</sup> La vivienda social o VIS son viviendas que tienen un valor igual o inferior a los 135 salarios mínimos legales vigentes y de 150 salarios en aglomeraciones urbanas definidas por el decreto 1467 de 2019.

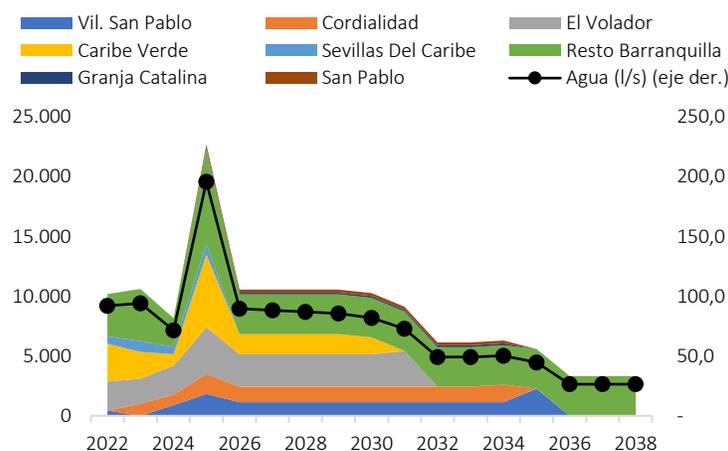
se realizó en dos casos: para las unidades faltantes dentro de los proyectos estratégicos y para las unidades que se generarán en el resto del municipio.

Para el primer caso se realizó un análisis de la velocidad anual a la que se ha desarrollado el proyecto estratégico desde que inició su actividad. Esta velocidad se contrastó con una velocidad supuesta estándar de 7%<sup>5</sup> anual. Luego de comparar ambas velocidades se tomó la que mostrara el mayor número de unidades por año entre las dos<sup>6</sup>, permitiendo hacer un análisis que no subestime el flujo de entrada de proyectos nuevos y así mismo de entregas de vivienda en los próximos años.

Para el segundo caso, unidades generadas en el resto del municipio, se observó la tendencia de los últimos años en cuanto a ventas de vivienda anuales (gráfica 2). Se supone que la generación anual de vivienda, fuera de los proyectos, en los próximos años será igual al promedio en ventas observado entre 2015 y 2021, lo que es razonable al tener en cuenta la formación de hogares y generación de vivienda en Barranquilla es muy similar (ver sección 2.2.).

Con estas estimaciones se generó un flujo estimado de entregas de vivienda entre 2022 y 2038. Como se puede observar en la gráfica 5 hay un pico de entregas en el año 2025 con 22.600 unidades entregadas. Esta distribución tiene sentido si se observa la situación constructiva de los proyectos activos, así como los supuestos que se establecieron sobre los proyectos inactivos, y en el resto del municipio. Una vez estimada la entrega de viviendas, el siguiente paso es traducir esto en demanda de agua. Para ello se hizo uso de la ecuación [1] descrita en la sección 4.1. y los postulados *j.* y *k.* de dicha sección (eje derecho de la gráfica 5).

**Gráfica 5. Estimación de entrega de viviendas en Barranquilla**



Fuente: Minvivienda y Coordinada Urbana – Cálculos Camacol y SSPD

<sup>5</sup> Este supuesto es razonable si se tiene en cuenta que proyectos estratégicos como macroproyectos suelen tener una duración superior a los 8 años (Minvivienda, 2021).

<sup>6</sup> En el caso de los proyectos inactivos (ver sección 2.3.) San Pablo y Granja Catalina, se asumen que desde 2022 registrarán actividad y tendrán una velocidad de desarrollo de 7% anual.

Nota: Las estimaciones contemplan sólo los proyectos estratégicos propuestos a la fecha, lo cual no excluye que en el periodo puedan plantearse otros adicionales

### 4.3. Crecimiento inercial de la demanda de agua

Debido al crecimiento demográfico se espera que año tras año crezca la demanda por agua de manera inercial. Para proyectar la demanda de los próximos años se plantean dos escenarios:

a. **Escenario 1 (población DANE):**

Se toman las proyecciones de población del municipio en su área urbana (DANE, 2022b) y se aplica la ecuación [1] de la sección 4.1. Con lo cual se tiene en cuenta las necesidades reales de la ciudad.

b. **Escenario 2 (suscriptores SUI):**

Usando los suscriptores contabilizados por el SUI entre 2013 y 2020 se proyecta su tendencia mediante distintos modelos estadísticos. Posteriormente, se traduce los suscriptores a agua usando la ecuación [1] y los postulados de la sección 4.1.

Cabe resaltar estos escenarios de proyección no necesariamente recogen la dinámica que se observará en la vivienda. Como se evidenció en la sección 2.2., es posible que al interior de un municipio las ventas de vivienda se desalineen de la formación de hogares por factores de desbalances entre oferta y demanda de vivienda en otros municipios. Igualmente, las metas de generación de vivienda en proyectos estratégicos no necesariamente son capturadas por las proyecciones de población o la tendencia observada en el crecimiento de los suscriptores.

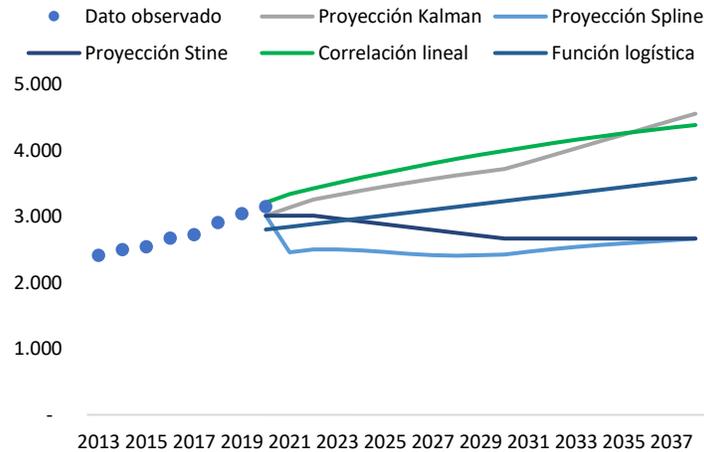
De esta manera, estas proyecciones darán un punto de partida (base) desde el cual se adicionará demanda de agua debido a la entrada de nuevas unidades de vivienda que proyecta entrarán desde 2022 (ver gráfica 5 de la sección 4.2.). La relación entre el punto de partida, la proyección de la demanda inercial, la demanda a causa de la dinámica de proyectos de vivienda, y las capacidades de la oferta se presentan en la sección 4.6.

Para el escenario 2 se pusieron en práctica varios modelos estadísticos: filtro de Kalman, Spline, Stine, regresión lineal simple<sup>7</sup> y función logística, las cuales se detallan en el Anexo 1. Los resultados obtenidos por los modelos (ver gráfica 6) permiten evidenciar que los modelos Stine, Spline, y función logística presentan una disminución en la proyección de los suscriptores. Esto hace que sean descartadas, pues la población normalmente tiende a aumentar y así mismo la cantidad de suscriptores que demandan los servicios públicos.

---

<sup>7</sup> Suscriptores en función de la población proyectada por el DANE (2022, b). Es similar al escenario 1, sin embargo, en este último caso no se asume que toda la población accede al servicio.

**Gráfica 6. Caudal (L/s) según modelos de proyección de demanda base**



Fuente: SUI (2022) y DANE - Cálculos Camacol y SSPD

Por su parte, las proyecciones con el método Kalman y regresión lineal presentan un comportamiento creciente. De esto se concluye que para Barranquilla la proyección con base en el método de correlación lineal se ajusta a los datos históricos, tomados del 2013 al 2019 y conserva la tendencia de estos.

#### 4.4. Planificación de obras

Los ejercicios de levantamiento de información para la identificación de obras de infraestructura, que representan aumentos en las capacidades de los sistemas de abastecimiento de agua potable, permiten establecer que no serán evidenciados cambios significativos en dichas capacidades en el periodo de observación prospectivo para el análisis de la oferta de servicios de acueducto y alcantarillado. Así mismo no se declara por parte del prestador presupuestos para la solicitud de concesiones de agua mayores a las que se encuentran vigentes. En virtud de lo mencionado, las gráficas 7 y 8 (ver sección 4.6.) ilustran las capacidades futuras del sistema y el caudal concesionado de agua por parte de la autoridad ambiental.

En el marco del estudio fue posible indagar en otras fuentes de información no oficiales, respecto a obras de infraestructura para la habilitación de capacidades de los sistemas, encontrando que la administración pública contempla la ejecución de un proyecto denominado “Acueducto Regional del Norte”, el cual será descrito a continuación. Sin embargo, para efectos de los análisis del estudio no será tenido en cuenta, ya que la información no fue constatada por parte del prestador, y no se precisan los datos necesarios para incluir el evento en los análisis.

El Acueducto Regional del Norte captará agua cruda del río Magdalena aguas arriba del actual punto de captación del municipio de Puerto Colombia para mejorar las condiciones de salinidad en épocas de estiaje. Se bombeará a través de equipos electromecánicos que se instalarán en un cuarto de bombas en el Malecón del Río. Esta infraestructura ha sido diseñada arquitectónicamente amigable con el entorno.

Desde el cuarto de bombas se enviará el agua cruda hasta el sistema de tratamiento de agua potable, que contará con todos los procesos convencionales (como desarenación, floculación, filtración y desinfección), garantizando así un agua óptima para el consumo humano. Una vez el agua esté tratada se entrega al tanque de almacenamiento de la planta.

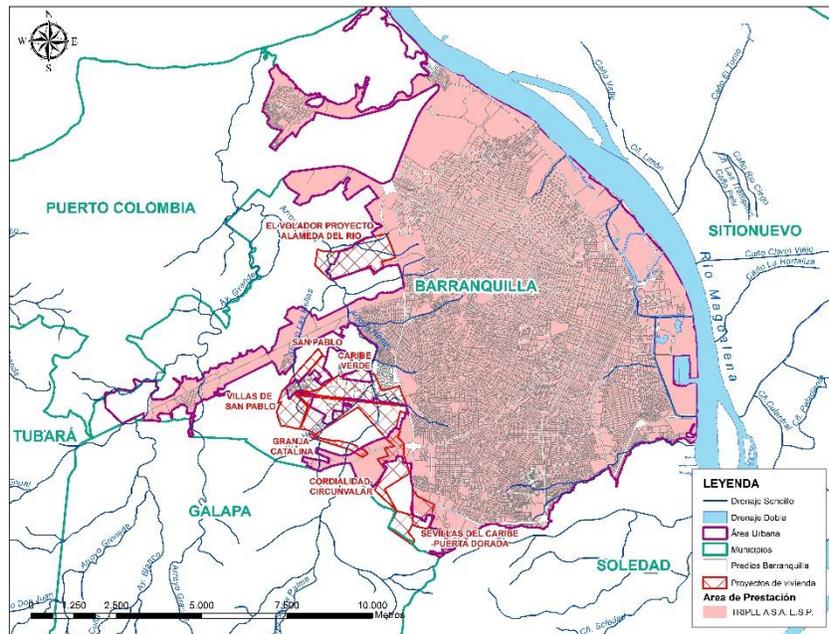
Posteriormente es bombeada al tanque de almacenamiento que será construido en acero fusionado y vidrio, ubicado en la zona alta de Altos de Riomar, y tendrá una capacidad de almacenamiento de 17.000 m<sup>3</sup>, desde donde será conducida por gravedad a través de tuberías hasta las redes de distribución de los diferentes barrios de Puerto Colombia, mejorando así la continuidad del servicio, la presión disponible en los hogares y la calidad de agua, especialmente en épocas de estiaje o verano.

Debido a que actualmente la ciudad de Barranquilla debe suplir parte de la demanda de Puerto Colombia, al entrar el servicio mejorarán también las condiciones de continuidad y presión de la zona norte y futura expansión de la ciudad al no tener que compartir la infraestructura diseñada para la ciudad.

#### 4.5. Ubicación proyectos estratégicos y áreas de prestación de servicio

Desde un contexto geográfico se analiza a continuación la correspondencia entre las áreas de prestación de los servicios públicos de acueducto y alcantarillado definidos por el perímetro de servicios establecido en el POT, y las áreas de los proyectos estratégicos de vivienda contemplados en el análisis. El ejercicio de superposición de capas permite evidenciar que los proyectos de vivienda se ubican en áreas excluidas del perímetro de prestación de servicios, lo que supone la gestión para un proceso de actualización del mencionado perímetro en el POT municipal.

**Mapa 3. Áreas de prestación de servicios y proyectos estratégicos**



Fuente: Minvivienda – Elaboración Camacol y SSPD

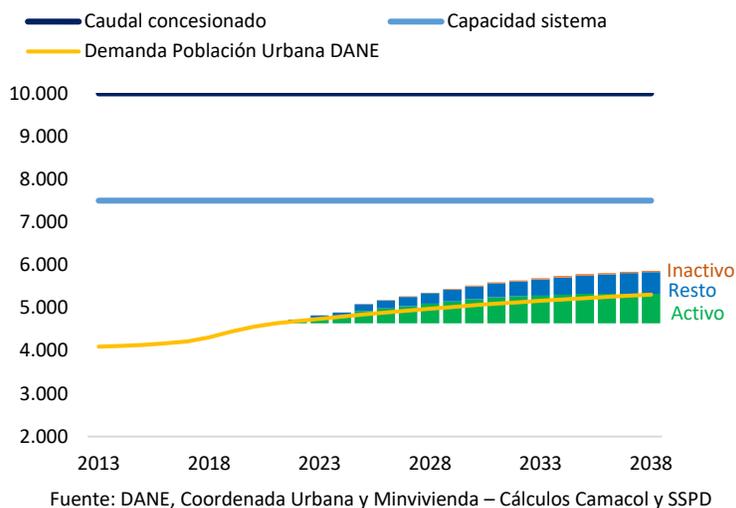
#### 4.6. Balance oferta y demanda

En este apartado se analiza en conjunto los resultados derivados de la proyección de entrada de nuevas viviendas (sección 4.2.), demanda inercial en los próximos años (sección 4.3.), caudal concesionado (sección 3.2.) y capacidades técnicas de los sistemas de acueducto (secciones 3.2 y 4.4.). Con esto se puede advertir de manera oportuna si, dadas las condiciones de los sistemas, existe la capacidad de satisfacer la demanda de agua que se va a generar en los próximos años debido al desarrollo de proyectos estratégicos de vivienda, así como del desarrollo inmobiliario fuera de estos.

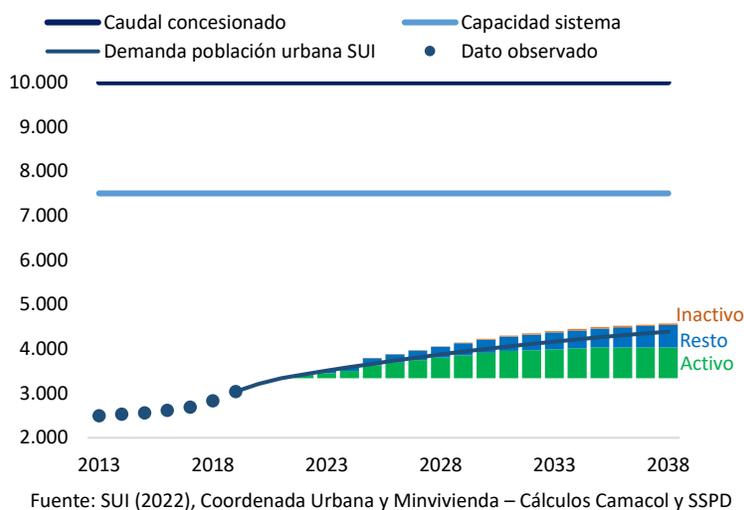
Como se explicó en la sección 4.3.1. se plantean dos escenarios de proyección. En el primero todas las personas proyectadas por el DANE acceden al servicio, y en el segundo se proyecta la demanda de agua teniendo en cuenta la tendencia observada en el crecimiento de los suscriptores en el municipio. Las condiciones de oferta (caudal concesionado y capacidad del sistema) no cambian bajo uno u otro escenario.

Así pues, se define un caudal concesionado equivalente al caudal de la vigencia 2020, 10.000 L/s. Con relación a la capacidad instalada, se observa (ver gráficas 7 y 8) una capacidad sin variaciones de 7.500 (L/s). Sin embargo, se advierte que esta capacidad puede verse aumentada con la eventual puesta en marcha del Acueducto del Norte, del cual, si bien se tiene información de su construcción, no se precisan fechas de operación y capacidades (ver sección 4.4.).

**Gráfica 7. Oferta y demanda de caudal (L/s) – escenario 1**



**Gráfica 8. Oferta y demanda de caudal (L/s) – escenario 2**



En la gráfica 7 se presentan los resultados del escenario 1. Se observa que el agua que se demandará por el desarrollo de los proyectos estratégicos, incluyendo los inactivos (ver sección 2.3.), y por la generación de vivienda en el resto del municipio desde 2022, se ubica por encima de lo proyectado con base en la población esperada por el DANE en todos los años. Para el final de 2038 se espera que la capacidad que hoy tiene el sistema se ubique por encima de las necesidades de demanda debido a la vivienda.

En el caso del escenario 2 la lectura es similar (gráfica 8). El caudal adicional demandado por la entrada de nuevas viviendas supera el caudal esperado por la proyección de suscriptores, con base en la tendencia observada, en todos los años. Sin embargo, en este caso la diferencia entre la capacidad del sistema y la demanda proyectada a 2038 es mayor a la calculada en el escenario 1.

Lo anterior se debe a diferencias en la base de demanda de agua que proyecta en cada escenario en el año 2021. En el escenario 2 la base depende de la cantidad de suscriptores, con lo cual no necesariamente recoge el hecho de que en los últimos años pudo haber problemas de acceso de la población al recurso hídrico. Por otro lado, el escenario 1 asume que toda la población tiene acceso.

Con base en los dos escenarios, se concluye que, tomando las consideraciones y postulados del estudio, no se esperan limitaciones en la prestación del servicio que genere preocupaciones frente a la disponibilidad del servicio en el corto y mediano plazo.

Si bien los análisis presentados hacen especial énfasis en las capacidades en la prestación del servicio de acueducto, para efectos del análisis de la oferta-demanda del servicio de alcantarillado se presume que el agua consumida se equipara con el agua residual de los hogares, y de esta manera el caudal de demanda de agua potable se corresponde con el caudal de demanda de los servicios de alcantarillado y tratamiento.

Bajo esta perspectiva, y considerando la capacidad de tratamiento actual reportada por el prestador (5.400 L/s), el servicio de alcantarillado podría estar asegurado bajo las condiciones del escenario 2. En el escenario 1, la demanda de alcantarillado y tratamiento podría estar asegurada para el segmento de viviendas de proyectos estratégicos activos que se corresponde con la demanda base proyectada desde los datos demográficos del DANE. En este escenario se plantea la necesidad de ampliar capacidades de alcantarillado y tratamiento para atender las necesidades de vivienda generadas fuera de los proyectos estratégicos, es decir, en el resto del municipio.

## 5. Conclusiones

La generación de vivienda en Barranquilla se ha triplicado en la última década. En el último año las ventas de vivienda nueva superaron las 9.700 unidades. Se puede afirmar que por ahora la generación de vivienda satisface la demanda de los próximos años, no obstante, el mercado advierte dinámicas de crecimiento en municipios de la aglomeración como Puerto Colombia o Soledad.

Las ventas en proyectos estratégicos representaron, en el último año, el 61% de las ventas en el municipio. El potencial de generación de vivienda de estos proyectos se estima que tenga importancia al menos hasta el año 2035, siendo el proyecto El Volador el que mayor número de unidades tiene aún por desarrollar con 20.581 unidades.

El área urbana del municipio de Barranquilla cuenta con prestación de servicios de acueducto y alcantarillado por parte de TRIPLE A, prestador que atiende a 322.826 suscriptores para el servicio de acueducto y de 318.901 suscriptores para alcantarillado (vigencia 2022). La infraestructura del servicio de acueducto consta de captación, aducción, desarenadores, potabilización, almacenamiento, conducción y distribución.

Los sistemas de potabilización tienen capacidad de 7.500 L/s de distribución de agua potable a razón de 24 horas al día para cada uno de los suscriptores, mientras que la capacidad instalada para el tratamiento de aguas residuales es de 5.398 L/s. Las pérdidas de agua identificadas según el reporte realizado en SUI ascienden a 54,7%. Vale la pena mencionar que los prestadores cuentan con un caudal concesionado por parte de la autoridad ambiental de 10.000 L/s.

De acuerdo con el indicador sintético IUS, el riesgo para la prestación de los servicios de acueducto y alcantarillado se clasifica como “bajo”, de acuerdo con el análisis de la vigencia más reciente. En esta calificación se destaca como aspecto por mejorar la *sostenibilidad financiera* y como fortalezas la *eficiencia en la gestión empresarial* y *eficiencia en la planificación y ejecución de inversiones*.

De acuerdo con los escenarios 1 y 2 se evidencia que los requerimientos de caudal definidos en la demanda proyectada no superan el caudal producido y proyectado en el sistema. Por su parte el escenario 2 presenta mayor holgura en la relación oferta – demanda.

## 6. Bibliografía

- Bacaër N. (2008). *Verhulst y la ecuación logística en la dinámica de la población*.  
[https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01562340v2/file/Verhulst\\_es.pdf](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01562340v2/file/Verhulst_es.pdf)
- Camacol. (2019). *Prospectiva Edificadora 2019. Una visión de corto y mediano plazo*.  
[https://camacol.co/sites/default/files/descargables/PROSPECTIVA%20EDIFICADORA%202019\\_1.pdf](https://camacol.co/sites/default/files/descargables/PROSPECTIVA%20EDIFICADORA%202019_1.pdf)
- Camacol. (2022). *Coordenada Urbana*. <https://camacol.co/productividad-sectorial/modernizacion-empresarial/coordenada-urbana>
- Carollo M. (2012). *Regresión Lineal Simple*. <https://anestesiario.org/2020/la-distancia-mas-corta-el-metodo-de-los-minimos-cuadrados/>
- DANE. (2020) *Documento Metodológico de elaboración de las proyecciones de población de Bogotá, D.C., a nivel de localidad hasta el año 2035 y de Unidad de Planeamiento Zonal – UPZ hasta el año 2024*. <https://www.dane.gov.co/files/censo2018/proyecciones-de-poblacion/Bogota/proyecciones-bogota-metodologia-desagregacion-loc-2018-2035-UPZ-2018-2024.pdf>
- DANE. (2022a). *Proyecciones de población*. <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/demografia-y-poblacion/proyecciones-de-poblacion>
- DANE (2022b). *Proyecciones de viviendas y hogares*.  
<https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/demografia-y-poblacion/proyecciones-de-viviendas-y-hogares>
- DNP. (2014). *Misión Sistema de Ciudades. Una política nacional para el sistema de ciudades colombiano con visión a largo plazo*. Bogotá: DNP.
- González C. (2009). *Splines: Curvas y Superficies*. <http://www.inf-cr.uclm.es/www/cglez/downloads/docencia/AC/splines.pdf>
- Función pública. (2011). *Ley 1469 de 2011*.  
<https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=43213#0>
- Función pública. (2015). *Decreto 1077 de 2015 Sector Vivienda, Ciudad y Territorio*.  
<https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=77216>
- Megbolugbe, I., et al. (1991). *The Economic Theory of Housing Demand: A Critical Review*. *The Journal of Real Estate Research*, 6(3), 381-393.
- Minvivienda. (2021). *Memoria justificativa - Por el cual se modifica parcialmente el Decreto 1077 de 2015*. [https://www.minvivienda.gov.co/system/files/consultasp/memoria-justificativa\\_misn.pdf](https://www.minvivienda.gov.co/system/files/consultasp/memoria-justificativa_misn.pdf)
- Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. (2010). *Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico - RAS*. Bogotá DC.

Minsalud. (2017). *Resolución 330 de 2017*. 1–9.

SSPD. (2021). *Estudio sectorial de los servicios públicos domiciliarios de Acueducto y Alcantarillado 2020*. [https://www.superservicios.gov.co/sites/default/files/inline-files/informe\\_sectorial\\_aa\\_30-12-21\\_vf.pdf](https://www.superservicios.gov.co/sites/default/files/inline-files/informe_sectorial_aa_30-12-21_vf.pdf)

SUI (2022). *Formatos Facturación Acueducto y Alcantarillado*. Consulta Bases de Datos SUI.

Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios. (2018). *Evaluación Integral de Prestadores. Empresas Municipales de Cali E.I.C.E. E.S.P. - EMCALI E.I.C.E. E.S.P.* Superservicios Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, 2(003), 1–224

## Anexo 1. Modelos de proyección de demanda

### A1. Filtro de Kalman

El filtro de Kalman es un algoritmo para restablecer un dato en la proyección lineal de un sistema de variables sobre el conjunto de información disponible, según se va estableciendo nueva información. Este filtro permite calcular de modo sencillo la verosimilitud de un modelo dinámico lineal, uniecuacional o multiecuacional, lo que permite estimar los parámetros y obtener predicciones de los modelos.

Los filtros de Kalman operan en modelos de espacio de estado, de acuerdo con Durbin y Koopman (2012), de la siguiente forma:

$$y_t = z\alpha_t + \varepsilon_t\varepsilon_t N(0, H) \quad [2]$$

$$\alpha_{t+1} = T\alpha_t + n_t n_t N(0, Q) \quad [3]$$

$$\alpha_1 N(\alpha_1, P_1) \quad [4]$$

donde  $y_t$  es la serie observada (posiblemente con valores faltantes) pero  $\alpha_t$  no se observa por completo. La primera ecuación (la ecuación de "medición") dice que los datos observados están relacionados con los estados no observados de una manera particular. La segunda ecuación (la ecuación de "transición") dice que los estados no observados evolucionan con el tiempo de una manera particular.

El filtro de Kalman funciona para encontrar estimaciones óptimas de  $\alpha_t$  (se supone que  $\alpha_t$  es Normal:  $\alpha_t \sim N(a_t, p_t$ , por lo que realmente hace el filtro de Kalman es calcular la media condicional y la varianza de la distribución para  $\alpha_t$  condicional en las observaciones hasta tiempo t).

Una vez que el filtro de Kalman se ha aplicado a todo el rango de tiempo, tiene estimaciones óptimas de los estados en  $p_t$  para  $t = 1, 2, \dots, t$ . Imputar datos es entonces simple a través de la ecuación de medición. En particular, solo se calcula:

$$\hat{y}_t = z\alpha_t \quad [5]$$

### A2. Spline

Es un modelo de regresión no paramétrica cuyo objetivo es encontrar un modelo computacional que permite predecir el valor de la variable en función de las covariables. Este modelo utiliza un método de interpolación que estima valores usando una función matemática que minimiza la curvatura general de la superficie, lo que resulta una superficie suave que pasa exactamente por los puntos de entrada. Estos puntos se ajustarán después con funciones polinómicas continuas de la siguiente forma:

1. La curva realiza interpolación del conjunto de puntos de entrada cuando las secciones polinómicas se ajustan de modo que la curva pasa a través de cada punto de entrada de acuerdo con Gonzáles Morcillo (2009).
2. La curva realiza una aproximación al conjunto de puntos de entrada cuando los polinomios se ajustan a la trayectoria general del punto de entrada sin pasar necesariamente a través de ningún punto de entrada de acuerdo con Gonzáles Morcillo (2009).

La función polinómica de n-ésimo grado se define como:

$$y = a_0 + a_1x + a_1x^2 + \dots + a_{n-1}x^{n-1} + a_nx^n \quad [6]$$

Donde  $a_t$  son constantes diferentes de cero y n es un entero no negativo.

Se debe tener presente que los Splines son:

1. Una curva definida a trozos mediante polinomios.
2. Se utilizan para aproximar curvas con formas complicadas.
3. Tienen una representación sencilla y son fáciles de implementar.
4. Tienen buenas propiedades matemáticas

### A3. Stine

Es un modelo de regresión no paramétrica que se basa en la interpolación racional con funciones racionales especialmente elegidas para satisfacer las siguientes condiciones:

- Si los valores de las ordenadas de los puntos especificados cambian de forma monótona y las pendientes de los segmentos de línea que unen los puntos cambian de forma monótona, entonces la curva de interpolación y su pendiente cambiarán de forma monótona.
- Si las pendientes de los segmentos de línea que unen los puntos especificados cambian de forma monótona, las pendientes de la curva de interpolación cambiarán de forma monótona.
- Si ocurre un pequeño cambio en la ordenada o la pendiente en uno de los puntos de las condiciones anteriores, estos dejaran de cumplirse. Entonces, hacer este pequeño cambio en la ordenada o la pendiente en un punto no causará más que un pequeño cambio en la curva de interpolación.

### A4. Correlación lineal

Es un modelo matemático paramétrico usado para aproximar la relación de una variable predicha a partir de otra predictora. Mediante las técnicas de regresión se busca una función que sea una buena aproximación de una nube de puntos ( $X_i, Y_i$ ). El modelo de regresión lineal simple tiene la siguiente expresión:

$$y = \alpha + \beta x + \varepsilon \quad [7]$$

Donde,  $\alpha$  es la ordenada en el origen (el valor que toma  $y$  cuando  $x$  vale 0),  $\beta$  es la pendiente de la recta (e indica cómo cambia  $y$  al incrementar  $x$  en una unidad) y  $\varepsilon$  es una variable que incluye un

conjunto grande de factores, cada uno de los cuales influye en la respuesta sólo en pequeña magnitud, a la que llamaremos error.  $x$  e  $y$  son variables aleatorias, por lo que no se puede establecer una relación lineal exacta entre ellas.

Para hacer una estimación del modelo de regresión lineal simple se utiliza el método de mínimos cuadrados que trata de buscar una recta minimizando la suma de cuadrados de las diferencias entre los valores reales observados ( $y_i$ ) y los valores estimados ( $\hat{y}_i$ ), mencionado por Carollo M. (2012).

Aplicado al caso de estudio, el concepto de correlación lineal se emplea para estimar los parámetros de la función lineal que modela una dependencia lineal entre dos variables: la demanda de acuerdo con la proyección de población según las estimaciones del DANE (2020) y la demanda de acuerdo con la proyección de suscriptores reportados en el SUI (2022). Para calibrar el modelo se emplean datos conocidos para ambas variables en un periodo comprendido entre 2013 y 2020.

La utilidad de este modelo radica en que se encuentra implícita una lógica de proporcionalidad entre el modelo empleado por el DANE (2020) para proyectar población y la dinámica de crecimiento de suscriptores. Esta aproximación encuentra un sustento importante en los planteamientos teóricos fundamentos estadísticos del DANE (2020) en los ejercicios de proyección.

## A5. Función logística

La función logística, conocida también como curva logística en forma de S (curva sigmoidea), es una función matemática que se utiliza en el crecimiento de poblaciones, mejorando el modelo exponencial. Se define mediante la siguiente ecuación:

$$P(t) = \frac{K P_0 e^{rt}}{K + P_0 (e^{rt} - 1)} \quad [8]$$

Donde,  $P$  representa el tamaño de la población,  $r$  representa la tasa de crecimiento,  $e$  es la constante de Euler,  $t$  es el tiempo y  $K$  el tamaño máximo de la población. Mediante la etapa de crecimiento se genera un modelo exponencial y a medida que comienza la saturación, el crecimiento se convierte en un modelo lineal hasta llegar a un punto donde se detiene.

El modelo exponencial de Thomas Robert Malthus no era muy realista, así que el matemático belga Pierre François Verhulst propuso la función logística donde comenta que la tasa de reproducción es proporcional a la población existente y a la cantidad de recursos disponibles, en igualdad de condiciones. Por ende, esta función permite ser utilizada en modelos de crecimiento demográfico. Sin embargo, se debe tener en cuenta que esta función requiere de dos parámetros iniciales, como lo son la población inicial  $P_0$  y el tamaño máximo de la población  $K$ .