

**RÍO PANCE: CRÓNICA DE UNA MUERTE ANUNCIADA**

**ANGIE VANESSA PÉREZ CASTELLANO  
ISABELLA SALAZAR CUESTA**

**UNIVERSIDAD ICESI  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL  
CALI  
MAYO 2019**

**RÍO PANCE: CRÓNICA DE UNA MUERTE ANUNCIADA**

**ANGIE VANESSA PÉREZ CASTELLANO  
ISABELLA SALAZAR CUESTA**

**Proyecto de Grado para optar el título de Ingeniero Industrial**

**Director proyecto  
FERNANDO ARENAS**

**UNIVERSIDAD ICESI  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL  
CALI  
MAYO 2019**

## Contenido

	pág.
<b>RESUMEN</b> .....	<b>5</b>
<b>1 Introducción</b> .....	<b>6</b>
1.1 Contexto, Justificación y Formulación del Problema .....	7
<b>2 Objetivos</b> .....	<b>12</b>
2.1 Objetivo General .....	12
2.2 Objetivo del Proyecto .....	12
2.3 Objetivos Específicos .....	12
<b>3 Marco de Referencia</b> .....	<b>13</b>
3.1 Antecedentes o Estudios Previos.....	13
3.1.1 Casos previos de aplicación de dinámica de sistemas.....	13
3.2 Marco Teórico .....	16
3.2.1 Demografía .....	16
3.2.2 Dinámica Poblacional .....	16
3.2.3 Concesión de Aguas Superficiales .....	17
3.2.4 Ecología Industrial y Metabolismo Urbano .....	17
3.2.5 Índice de calidad del Agua (ICA) .....	18
3.2.6 Dinámica de Sistemas .....	19
3.3 Contribución Intelectual o Impacto del Proyecto .....	20
<b>4 Metodología</b> .....	<b>22</b>
<b>5 Descripción del modelo</b> .....	<b>24</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....	<b>25</b>

## **Lista de Ilustraciones**

Ilustración 1. Mapa administrativo del Municipio de Santiago de Cali. .....	9
Ilustración 2. Diagrama de subsistemas de la sostenibilidad del Río Pance. .....	10
Ilustración 3. Diagrama pasos del proceso de modelado.....	22

## **Lista de Tablas**

Tabla 1. Proyecciones de Población Cali-Comuna 22.....	8
--	---

## **Lista de Anexos**

Anexo 1. Artículo Académico. ....	29
-----------------------------------	----

## RESUMEN

En la actualidad, el río Pance es uno de los pocos ríos con potencial hídrico que le queda a la ciudad de Cali, sin embargo, situaciones como el incremento de proyectos urbanísticos, el aumento de captaciones y la contaminación, amenazan hoy por hoy la sostenibilidad del río. En consecuencia, este trabajo tiene como objetivo evaluar que tan sostenible será el río Pance en un periodo de 20 años, teniendo como base el indicador Índice de Calidad del Agua (ICA), que calcula la calidad del agua integrando varios factores como lo son el aumento de captaciones, el crecimiento poblacional y el incremento de vertimientos. Lo anterior se lleva a cabo por medio de un modelo de simulación de la situación actual, empleando Dinámica de Sistemas, método que permite analizar y entender el dinamismo de problemas reales a través del tiempo. El modelo planteado en el software Vensim, muestra las interacciones de los diferentes sistemas que aportan a la dinámica abordada, que son el sistema legal, hídrico, poblacional y de vertimientos. Los resultados obtenidos del modelo, según el planteamiento de diferentes escenarios donde varía el factor de consumo, indican que, si no existe un control de la dinámica actual del río, la calidad del agua de este, tenderá a encontrarse en un estado de deterioro, puesto que el índice de calidad del agua podrá tomar valores menores o iguales a 0.5 asociados a una categoría mala o muy mala, lo que trae consigo, en un horizonte de 20 años, la pérdida de su capacidad y potencial para abastecer las necesidades derivadas del recurso hídrico.

**Palabras claves:** Dinámica de sistemas, sostenibilidad, índice de calidad del agua, crecimiento urbano, vertimientos.

# 1 Introducción

Para el desarrollo de la vida se requieren de distintos recursos que permitan preservar la existencia de las poblaciones. Entre ellos se encuentra el agua, elemento vital e indispensable para vivir. El presente proyecto de investigación, evalúa la sostenibilidad de uno de los principales ríos de la ciudad de Santiago de Cali, el río Pance, empleando la teoría de Dinámica de Sistemas, con el fin de comprender y reflejar el comportamiento actual de la demanda de este recurso hídrico. El río Pance, nace en el Parque Nacional Natural de los Farallones, y se caracteriza por su gran extensión y potencial hídrico, lo que lo ha convertido en la principal fuente de consumo de agua para la población ubicada alrededor de la cuenca, en especial, la comuna 22.

La diferencia de este estudio con otros realizados con base en el río Pance, consiste en que, a través de la Dinámica de Sistemas, se logra identificar un comportamiento relacionado con la demanda y oferta del recurso hídrico por parte de la población. Lo anterior, se realiza desde la perspectiva del metabolismo urbano, que permite entender los sistemas urbanos como un sistema natural, donde se analiza su ciclo de vida y las diferentes entradas y salidas al sistema. En este caso, se relaciona el crecimiento urbano asociado con la atractividad y valorización de la zona y las descargas de vertimientos generadas por la población al sistema hídrico.

Para el desarrollo de este proyecto fue necesario utilizar datos relacionados con proyecciones de la población de la comuna 22, niveles de caudal del río Pance, número de captaciones de agua y los principales tipos vertimientos per cápitas. Con lo anterior, se estimó la oferta y demanda del agua, las concentraciones de los diferentes tipos de vertimientos y se calcularon los indicadores relacionados con la calidad del agua y el porcentaje de consumo. De igual forma, se usó la metodología de dinámica de sistemas propuesta por Sterman (2000).

Por lo anterior, el objetivo de este proyecto de investigación es establecer la dinámica actual del río Pance relacionando el crecimiento poblacional y los vertimientos al río por parte de la población urbana, con el fin de generar escenarios futuros que permitan diseñar políticas para preservar y garantizar la sostenibilidad del río Pance y evitar su deterioro, de tal forma que no se replique la historia de los otros ríos de la ciudad, como lo es el Río Cañaveralejo, uno de los más contaminados.

## 1.1 Contexto, Justificación y Formulación del Problema

El Río Pance, nace en el cerro Pance, ubicado en el Parque Nacional Natural de los Farallones de Cali, a 4.200 m.s.n.m. La cuenca se encuentra en el sur occidente del Municipio de Santiago de Cali, sobre la Cordillera Occidental (DAGMA, 2009) con “una longitud de 27,38 k, un área de 72,10 m<sup>2</sup> y un caudal aproximado de 4,85 m<sup>3</sup>/s. Desde su nacimiento hasta la desembocadura está segmentada por tres zonas delimitadas político- administrativamente como: cuenca alta que corresponde al área de Parque Nacional Natural Farallones, cuenca media que abarca el área del corregimiento de Pance como zona rural de Cali, y cuenca baja que corresponde al área de la actual comuna 22 del perímetro urbano de Cali” (Norberto et al., 2016, p.12 ). Debido a su extensión y potencial hídrico, este se ha convertido en la principal fuente de consumo de agua para la población ubicada alrededor de la cuenca.

Según un informe estadístico del Departamento Administrativo de Planeación Municipal, que muestra las proyecciones de la población en número de habitantes de la comuna 22, desde el año 2006 hasta el 2036, siguiendo un escenario de crecimiento según las tendencias del DANE (Departamento Administrativo Nacional de Estadística); se logra establecer que existe una relación directa entre cada año y el número de habitantes ubicados en esta zona, puesto que, al transcurrir los años se presenta un crecimiento de población con respecto al año anterior, teniendo así un porcentaje de crecimiento promedio de 2,41%, para los treinta y dos años proyectados, el anterior comportamiento se observa en la Tabla 1 (Departamento Administrativo de Planeación, n.d.). Dicho porcentaje se obtiene al dividir la diferencia entre el año evaluado y el año anterior, sobre el año en cuestión.

En la Tabla 1 se puede observar que para el año 2016 según la proyección del DANE, la población en la comuna 22 era equivalente a 11.453 habitantes, por otro lado, en el mismo año se otorgaron 43 licencias de construcción, con un total de 157.014 m<sup>2</sup> de área aprobada para construir, de la que 147.140 m<sup>2</sup> hace referencia a construcción para vivienda. Asimismo, se aprobó la construcción de 609 viviendas (Alcaldía de Santiago de Cali, 2017), lo que trajo consigo un crecimiento urbano considerable en la zona y mayor demanda de recursos debido a su atractividad y valoración como área potencial para la construcción de proyectos de urbanización.

**Tabla 1. Proyecciones de Población Cali-Comuna 22.**  
Fuente: Autores.

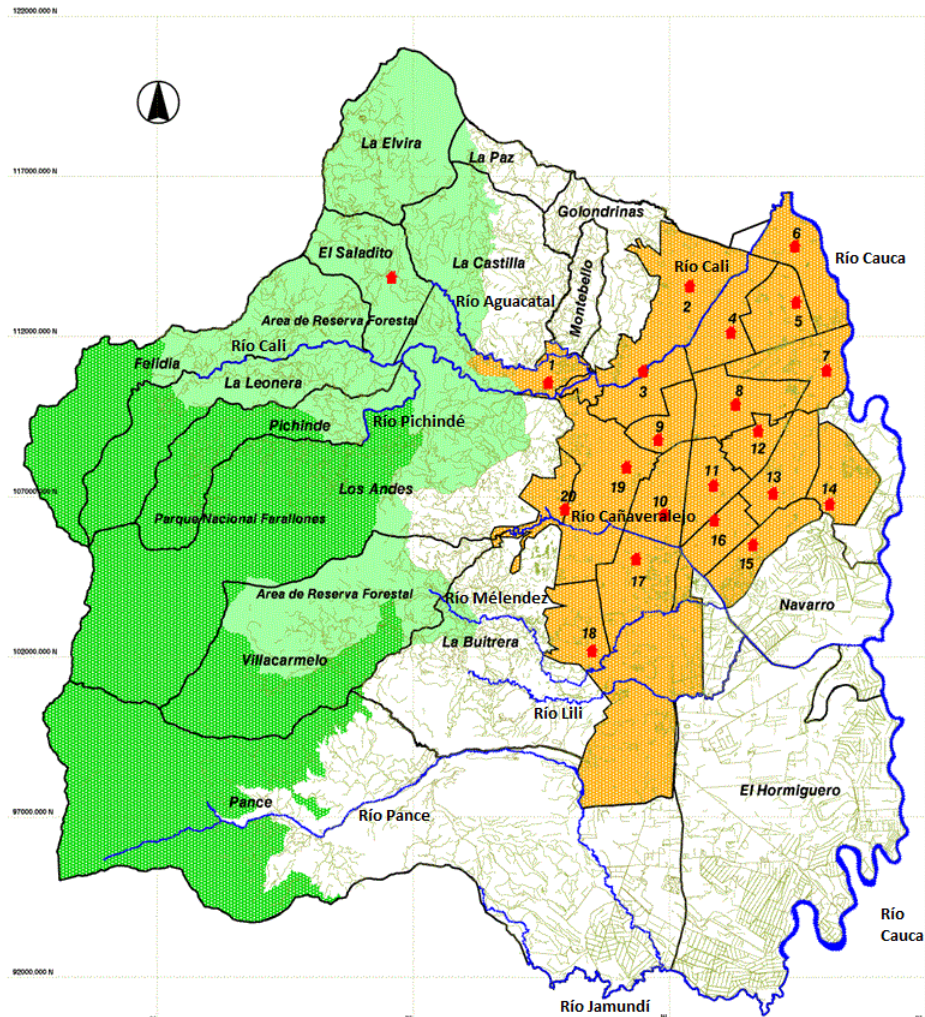
<b>Año</b>	<b>Proyección Comuna 22 (habs)</b>	<b>Crecimiento (habs)</b>	<b>% Crecimiento</b>
2016	11.453	293	2,62%
2017	11.748	295	2,57%
2018	12.044	297	2,52%
2019	12.343	299	2,48%
2020	12.637	294	2,38%
2021	12.922	285	2,25%
2022	13.213	291	2,25%
2023	13.504	291	2,21%
2024	13.796	292	2,16%
2025	14.088	292	2,12%
2026	14.380	292	2,07%
2027	14.669	289	2,01%
2028	14.959	290	1,98%
2029	15.249	290	1,94%
2030	15.540	291	1,91%
2031	15.832	292	1,88%
2032	16.125	293	1,85%
2033	16.420	295	1,83%
2034	16.716	296	1,80%
2035	17.014	298	1,78%
2036	17.315	300	1,77%
		<b>%Creci Prom</b>	<b>2,41%</b>

Por otro lado, para lograr la captación del recurso hídrico del Río Pance y abastecer el consumo de la comunidad, la entidad gubernamental competente, otorga concesiones que hacen referencia al derecho de explotación o utilización del caudal del río. Dentro del marco legal, en el año 2017, 420 predios tuvieron la concesión aprobada ya sea por la CVC (perímetro rural) o por el DAGMA (perímetro urbano) para obtener el líquido vital, de estos 21 usuarios corresponden a la comuna 22 (EL TIEMPO, 2017). Debido a que el crecimiento urbano, genera mayor demanda del recurso hídrico, las solicitudes por otorgamiento de concesiones también presentan una tendencia de crecimiento, con el fin de lograr abastecer dicha necesidad y aprovechar el potencial hídrico del río.

Por lo anterior, se puede evidenciar que la dinámica poblacional que enfrenta el sector, se relaciona directamente con la sostenibilidad del Río Pance, ya que al aumentar la población se hace mayor uso del recurso hídrico para satisfacer necesidades básicas de consumo y recreacionales. Ahora bien, situaciones similares han afectado el estado biológico y natural de otros ríos pertenecientes a la ciudad de Cali, como lo son los ríos Lili, Cañaveralejo y Meléndez. Ríos víctimas de contaminación por planes de ordenamiento territorial, desechos de obras de construcción, explotación minera, aguas residuales y basuras, que a lo largo del tiempo han deteriorado la calidad de sus aguas y su funcionalidad. En la ilustración 1, se observa el mapa del Municipio de Santiago de Cali, con la delimitación y



ubicación de los ríos mencionados anteriormente dentro del área rural y urbana, siendo esta ciudad, “la única de Colombia que es atravesada por siete ríos, pero a su vez la única que los contamina a todos” (Periódico El País, 2018).

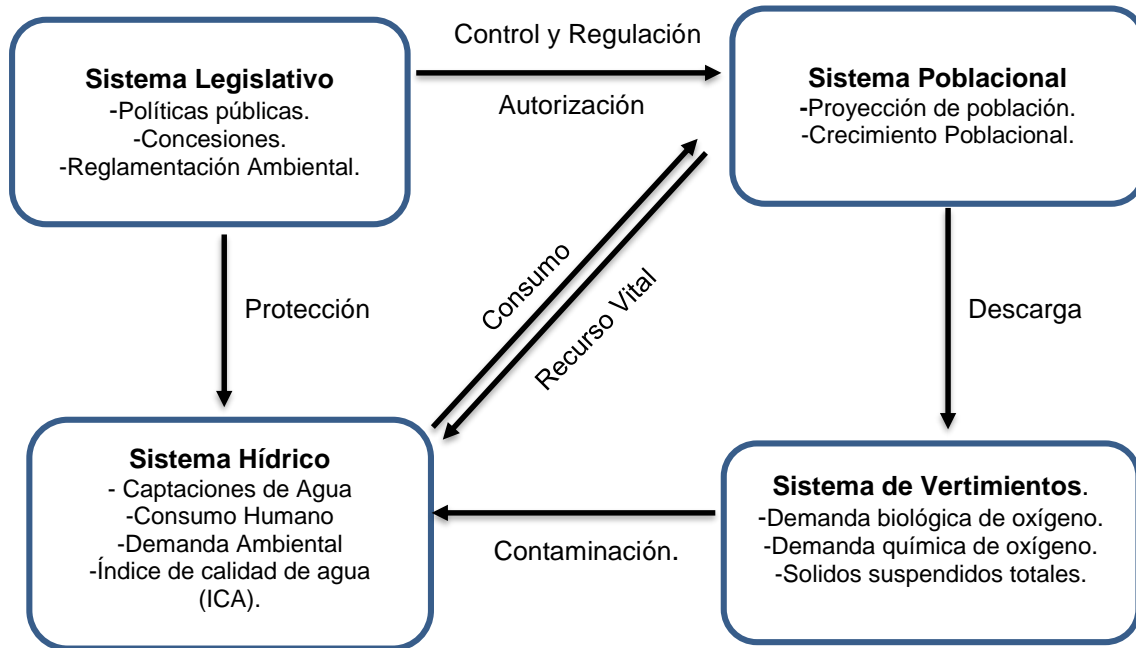


**Ilustración 1. Mapa administrativo del Municipio de Santiago de Cali.**  
**Fuente: (Departamento Administrativo de Gestión del Medio Ambiente – DAGMA, 2005).**

Teniendo en cuenta la interacción de los sistemas en estudio (Río-Ciudad), se refleja un flujo de entrada que es equivalente al consumo del recurso hídrico y flujos de salidas por parte de la población como lo son los desechos, desperdicios y vertimientos, que afectan el estado y la sostenibilidad del río en sí mismo. Lo anterior, se refleja en la situación actual de los ríos Lili, Cañaveralejo y Meléndez. Por lo tanto, se desea evaluar: ¿Cuál es el riesgo de que el Río Pance se convierta en un vertedero y no sea sostenible en un horizonte de 20 años, para lograr abastecer su demanda ambiental y consumo poblacional, replicando así la historia de los demás ríos de la ciudad?

Con el objetivo de identificar y agrupar las variables que interactúan en la problemática, el diagrama de subsistemas permite visualizar la relación y

dependencia de cada escenario que se considera para la evaluación de la sostenibilidad del Río Pance.



**Ilustración 2. Diagrama de subsistemas de la sostenibilidad del Río Pance.**  
Fuente: Autores.

En la ilustración 2, se exponen los siguientes subsistemas:

**Sistema Legislativo:** Este subsistema representa la regulación y control de las entidades encargadas de otorgar concesiones, permisos, autorizaciones y licencias ambientales, para el uso del recurso hídrico.

**Sistema Poblacional:** Representa la relación directa que existe entre el crecimiento urbano, en especial de la comuna 22, con respecto a la necesidad del recurso hídrico para consumo. Este subsistema está relacionado con el sistema hídrico y el legislativo, debido a que el consumo de agua por parte de la población se da gracias a concesiones y permisos otorgadas por entidades públicas.

**Sistema de Vertimientos:** Se refiere a todas las descargas contaminantes depositadas en el río, relacionadas con el uso y consumo del agua.

**Sistema Hídrico:** Se refiere a la consideración del agua como recurso vital y fundamental para la población, al igual que su uso para satisfacer necesidades ambientales. Asimismo, engloba a aquellos factores externos que pueden afectar la calidad de del agua superficial, como lo es contaminación por parte de la comunidad.

## **Justificación o Importancia de la situación objeto de estudio**

El agua es un recurso vital, esencial e indispensable para el desarrollo de la vida y el sostenimiento de las poblaciones. Por esta razón, es importante el cuidado y la preservación de las fuentes que proveen dicho recurso para garantizar a futuro el sostenimiento, la permanencia de dichas fuentes y la existencia del recurso. Por este motivo, es de gran relevancia evaluar la sostenibilidad del Río Pance, ya que este se ha convertido en la principal fuente hídrica para las viviendas cercanas al Río y para la comuna 22 de Cali, la cual comprende los barrios Ciudad Jardín y Pance.

Por otra parte, “el río Pance es el último de los siete ríos que le queda a la ciudad. Los otros seis: ríos Cali, el Aguacatal, Santa Rita, Meléndez, Cañaveralejo y el Lili, fueron convertidos en cloacas en solo 45 años, por situaciones similares a las que amenazan actualmente a la cuenca de Pance”(Flechas, 2006), entre las cuales están el incremento de los proyectos de urbanización que aumentan la población demográfica de la zona aledaña al río, el nulo control que existe en el momento de distribuir concesiones para el consumo del agua proveniente de la cuenca, y por último, los desechos y vertimientos provenientes de actividades humanas que se descargan al río.

Finalmente, dichas situaciones a lo largo del tiempo van a seguir existiendo y no se podrán evitar debido a que son variables propias de los entornos urbanos; crecer, consumir y desechar. Sin embargo, el impacto que estas van a tener frente a la sostenibilidad del río, varía de acuerdo a las políticas que se planteen para la preservación y sostenibilidad de la fuente hídrica. Dicho lo anterior y teniendo en cuenta que Pance es un río que en los últimos años ha presentado una calidad excelente en comparación a los demás, se hace importante realizar una buena gestión del mismo para su preservación tanto en el presente como en el futuro. Lo anterior, refleja el propósito principal y la importancia de estudiar la problemática planteada.

## 2 Objetivos

### 2.1 Objetivo General

Plantear diferentes escenarios futuros que permitan evaluar la sostenibilidad del Río Pance como recurso hídrico, teniendo en cuenta el crecimiento poblacional y los vertimientos al río por parte de la población urbana.

### 2.2 Objetivo del Proyecto

Diseñar un modelo preliminar que permita determinar el impacto que genera el crecimiento demográfico y los vertimientos depositados a la cuenca por parte de la población, en la sostenibilidad del Río Pance como recurso hídrico.

### 2.3 Objetivos Específicos

1. Determinar los diferentes subsistemas que interactúan en la dinámica del Río Pance.

**Entregable:** Diagrama de subsistemas.

2. Establecer la hipótesis dinámica del sistema del Río Pance, como también la interacción de causa-efecto entre las variables clave.

**Entregables:** Diagrama causal y Diagrama de niveles y flujos que represente el esquema de la dinámica analizada.

3. Desarrollar y validar el modelo de simulación.

**Entregable:** Modelo de simulación y documentación de su respectivo análisis.

4. Generar diversos escenarios plausibles sobre el modelo para proponer políticas que aporten a la sostenibilidad futura del Río.

**Entregable:** Propuesta de política de control.

5. Escribir un artículo académico basado en los resultados generados por el modelo.

**Entregable:** Artículo académico.

## 3 Marco de Referencia

### 3.1 Antecedentes o Estudios Previos

La cuenca hidrográfica es un sistema dinámico cuyo funcionamiento corresponde a complejos mecanismos que resultan de la interacción de una serie de elementos bióticos, abióticos y antrópicos (Mabel Andrea Zabala Pérez, 2011). Por tal razón es necesario tener una visión sistémica para entender el funcionamiento de la cuenca, con el fin de comprender los factores que interactúan en ella, es por esto que la Dinámica de Sistemas (DS) se ha utilizado en diferentes casos para el análisis y la generación de estrategias o políticas en pro a la conservación de las mismas. A continuación, se presentan distintos estudios internacionales y nacionales, en donde se ha empleado DS para la evaluación de cuencas hidrográficas.

#### 3.1.1 Casos previos de aplicación de dinámica de sistemas.

A nivel internacional, se distinguen los siguientes casos de aplicación de DS en la gestión de cuencas:

- **Cuencas de los ríos Piracicaba, Capivari y Jundiaí, ubicados en Brasil.**

En este proyecto se evalúa la disponibilidad de los recursos hídricos en las cuencas de los ríos Piracicaba, Capivari y Jundiaí, que se encuentran en los estados de Minas Gerais y São Paulo, Brasil. Lo anterior, mediante la ejecución de un modelo de dinámica de sistemas que calcula el suministro de agua, demandas del recurso y cargas de contaminación de diferentes consumidores, considerando simulaciones de 50 años, con el fin de ayudar al Comité de dichas Cuencas (Sánchez-román et al., 2009).

Dentro de los resultados se encontró que para el año 2054 las cuencas estarán en una situación crónica de escasez donde la demanda del agua aumentará hasta un 76%, el 39% del agua disponible provendrá de la reutilización de las aguas residuales y la carga de contaminación se incrementará en un 91% (Sánchez-román et al., 2009). Lo anterior, permitió determinar que los recursos hídricos de las cuencas evaluadas se encuentran en un punto de inflexión de gestión crucial (Sánchez-román et al., 2009). En resumen, la metodología de dinámica de sistemas desarrollada demostró ser una herramienta útil para planificar, analizar y evaluar tanto sistemas como políticas de los recursos hídricos hacia la sostenibilidad de dichos recursos (Sánchez-román et al., 2009).

- **Cuenca del Río Bravo, México – EEUU.**

En este caso, se estima la variación en la calidad/cantidad de agua debido al cambio climático y crecimiento poblacional, evaluando así, su impacto en el desarrollo de la comunidad en la región fronteriza entre México y Estados Unidos de la cuenca del Río Grande/Río Bravo, ya que son problemas críticos que enfrenta esta región. Para

estimar la variación en diferentes parámetros de calidad del agua, se utilizó un modelo conservador con los escenarios más probables de temperatura/precipitación producidos por el Panel Internacional sobre el Cambio Climático. Por lo anterior, se propuso un modelo de dinámica de sistemas con el fin de comprender la compleja interacción de los factores que rigen la cantidad/calidad del agua como sus efectos en las condiciones sociales y económicas. Los resultados del modelo, mostraron que el cambio climático puede modificar el agua disponible que es necesaria para mantener la calidad de vida, y como la creciente población y las demandas planteadas por el dinamismo de las actividades económicas en estas ciudades podrían empeorar algunas variables (Duran-Encalada, Paucar-Caceres, Bandala, & Wright, 2017).

Finalmente, el modelo simula, durante un período de 70 años, políticas y decisiones que tienen el potencial de mejorar las condiciones y prevenir los riesgos que pueden conducir al descontento social y obstaculizar el desarrollo económico, como establecer patrones de consumo de agua más razonables; desarrollar sistemas eficientes de distribución de agua en áreas urbanas y promover un intercambio más favorable de bienes agrícolas y otros (Duran-Encalada et al., 2017).

- **Río Suches, ubicado en la frontera política de Perú y Bolivia.**

En este estudio, se propone un modelo de simulación para la identificación y cuantificación de los impactos ambientales en el río Suches, ubicado en la frontera política entre Perú y Bolivia. Dicho modelo basado en el método de dinámica de sistemas, evalúa las principales causas de contaminación derivadas de la inadecuada gestión y planificación municipal (Soliz, 2016). El modelo realizado comprende tres factores principales que son contaminación por aguas residuales, consecuencias de la contaminación y medidas de mitigación.

Como resultados se obtuvo que la contaminación de la cuenca del río Suches, es un problema ecológico que involucra la población, debido a que no existen políticas que regulen las actividades minerales y no se realiza el respectivo tratamiento a las aguas residuales provenientes de la comunidad. Por esta razón, las principales causas de contaminación del río Suche son la minería y el vertimiento de aguas residuales. Asimismo, se identifica que dicha contaminación afecta la calidad de las aguas del río y causa contaminación de suelo, pérdida de la fauna y flora involucrada en el sistema natural y enfermedades en la población aledaña al río. Por último, el autor propone la creación de políticas que ayuden a la mitigación ambiental del río y la región (Soliz, 2016).

A nivel nacional, se distinguen los siguientes casos de aplicación de DS en la gestión de cuencas:

- **Cuenca del Río Pance, Colombia.**

En este estudio se evaluó la sostenibilidad de la cuenca del Río Pance como recurso hídrico, usando Dinámica de Sistemas. Teniendo en cuenta lo anterior se realizó un modelo que permitió describir las interacciones entre los sistemas demográfico, hidrológico y legal de la cuenca del río. La dinámica que presenta el sistema está fuertemente influenciada por un fenómeno de crecimiento urbano alrededor de la cuenca del Río Pance. A partir de dicho modelo, se obtuvo que la sostenibilidad del río puede verse afectada si el consumo total de agua superficial mantiene la dinámica actual durante un horizonte de 9 años. Asimismo, a partir del análisis de sensibilidad se evidenció que por medio de la implementación de una política de control del consumo se puede generar un balance en el sistema (Niño & Restrepo, 2016).

Finalmente, Giraldo & Restrepo (2016) concluyen que la Dinámica de Sistemas es una herramienta útil para el manejo de cuencas hídricas, ya que propicia el planteamiento de estrategias a partir de la integración de diferentes sistemas involucrados.

- **Cuenca del Río Yumbo, Colombia.**

Mabel Andrea Zabala Pérez (2011), economista de la Universidad del Valle realizó en su proyecto de pregrado un análisis de diferentes estrategias de desarrollo sostenible a nivel de la cuenca hidrográfica del río Yumbo. Lo anterior, a partir de un modelo derivado de la problemática construido con dinámica de sistemas, considerando factores ambientales, económicos y sociales. Dentro del factor ambiental se consideró la contaminación del agua de la cuenca, utilizando la dinámica de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO). En la parte del factor social se evaluó la dinámica demográfica de la cuenca del río Yumbo, determinando el comportamiento dinámico de la población a partir de las tasas de natalidad, mortalidad y migraciones de Yumbo (Mabel Andrea Zabala Pérez, 2011).

Como resultado de los diferentes escenarios evaluados, la autora Mabel Andrea Zabala Pérez (2011), propone una complementariedad de estrategias para dirigir la cuenca en pro del desarrollo sostenible, las cuales son, la implementación de tecnologías para el ahorro del consumo del agua, la imposición de la autoridad ambiental a través de tasas retributivas, y ofrecer un costo de oportunidad a otros usos del suelo, para la conservación del área boscosa, evitando la reducción de la cantidad del agua demandada para actividades agropecuarias y consumo doméstico.

Para finalizar, Mabel Andrea Zabala Pérez (2011), concluye que la dinámica de sistemas, “aporta en la comprensión de las interconexiones entre subsistemas de la cuenca y la definición de escenarios de acuerdo a las estrategias implementadas”.

## 3.2 Marco Teórico

### 3.2.1 Demografía

La demografía hace referencia a la ciencia que estudia estadísticamente la estructura y dinámica de las poblaciones (Valero Juan, 2009), tratando desde un punto de vista principalmente cuantitativo, su dimensión, su estructura, su evolución y características generales (Palladino, 2010). De acuerdo con Valero Juan (2009), en los fines principales de la demografía se encuentran, analizar la dimensión de la población, conocer la estructura de la misma, es decir el cómo se distribuyen en función de variables demográficas de persona (edad, sexo, estudios, raza, residencia, etc...), estudiar la evolución a lo largo del tiempo, del número y estructura de la población y por último determinar los fenómenos demográficos que condicionan o cambian el número, estructura y variaciones de la población de una zona geográfica en función el tiempo.

Ahora bien, estadísticamente, **la población**, es en sí, el conjunto de individuos que responden a una misma definición (Vallin, 2010), es decir, que las poblaciones humanas son un conjunto de personas que habitualmente residen en una zona geográfica, en un momento determinado (Valero Juan, 2009), y que son definidas por alguna razón o característica especial, por ejemplo, una de las características por las que habitualmente se define una población es la de compartir un espacio geográfico (Palladino, 2010): la población de la Comuna 22 de Cali.

### 3.2.2 Dinámica Poblacional

La dinámica poblacional es un aspecto importante que se debe estudiar en la demografía, debido a que esta representa las variaciones que sufren las poblaciones en función del tiempo. Según Palladino (2010) los cambios mencionados, se deben a tres fenómenos básicos: fecundidad, mortalidad y migraciones, los cuales se denominan componentes demográficos. El análisis de la fecundidad estudia la incorporación de los individuos a la población, y se expresa a través de tasas como la tasa de natalidad (relaciona el número de nacidos vivos en la población total que se producen en un determinado territorio) o la tasa de fecundidad general (relación que existe entre el número de nacimientos ocurridos en cierto periodo y la cantidad de población femenina fértil) (Valero Juan, 2009). La mortalidad estudia la salida de individuos de una población y se expone generalmente mediante la tasa de mortalidad global (se refiere al número de defunciones de la población que resultan de un determinado territorio) (CIDEAD, 2010). Por último, las migraciones se refieren a los desplazamientos territoriales de las personas (Palladino, 2010).

Para atender la dinámica poblacional en cuanto al abastecimiento del agua dentro de la Comuna 22, el gobierno otorga una serie de concesiones a diferentes empresas, que les permite captar agua del Río Pance y proveerla a la comunidad para su consumo. Debido a lo anterior es importante traer a colación la definición de concesión de aguas superficiales.



### **3.2.3 Concesión de Aguas Superficiales**

La concesión de aguas superficiales (aguas que se encuentran en la superficie o exterior de la tierra), es un medio por el cual se adquiere el derecho a usar o aprovechar las aguas que son de uso público provenientes de ríos, quebradas y/o arroyos. Este derecho se adquiere por lo regular para el abastecimiento doméstico, sin embargo, también se otorgan para uso industrial, explotación petrolera, generación hidroeléctrica, riego y silvicultura, recreación y agricultura (Corporación Autónoma Regional - CAR, 2000).

Para el proceso de otorgar concesiones de agua superficiales, existen prioridades, debido a que unos usos tienen más importancia que otros. En la lista de usos que se consideran para otorgar el permiso de la concesión, se encuentra en primer lugar la utilización del agua para el consumo humano, colectivo o comunitario, sea urbano o rural (CAR, 2000).

### **3.2.4 Ecología Industrial y Metabolismo Urbano**

El deterioro ambiental actual de los diferentes ecosistemas, resultado de la actividad para la obtención de recursos y el crecimiento demográfico en los últimos siglos, “pone a la sociedad actual en una situación en la que se deben replantear los procesos de producción bajo una óptica del máximo aprovechamiento de energía y recursos naturales”(Torre-Marín, Granados, Herrera, & Martínez, 2009, p.64). A partir de esto, las ciudades han sido impulsoras del desarrollo socioeconómico del mundo, pero así mismo se han convertido en las principales fuentes de problemas ambientales, debido a que los diferentes ecosistemas urbanos que existen y de los cuales la población hace uso, han venido evidenciando una trayectoria insostenible (Wu, 2014).

Por consiguiente, dado que el ser humano desea conocer el entorno en el cual esta interactuando, se han establecido diferentes teorías que estudian las variables que afectan la sostenibilidad, capacidad y equilibrio de los ecosistemas en los que habita.

#### **3.2.4.1 Ecología Industrial:**

Graedel & Allenby (2003), definen la Ecología Industrial como:

“El estudio de los organismos tecnológicos, el uso de sus recursos, sus impactos ambientales y la manera en que sus interacciones con el mundo natural pueden ser estructuradas para lograr sostenibilidad global dada cierta evolución económica, cultural y tecnológica”.

De manera análoga, la Ecología Industrial utiliza como modelo, la estructura de los sistemas naturales, para entender la dinámica de los comportamientos de los procesos industriales y así conseguir métodos más eficientes y sostenibles. (Newell & Cousins, 2015).

Bajo el concepto de Ecología Industrial, la adaptación de los procesos naturales a los sistemas urbanos, se conoce como Metabolismo Urbano.

### **3.2.4.2 Metabolismo Urbano:**

Se define como “la suma total de los procesos técnicos y socioeconómicos que ocurren en las ciudades, lo que resulta en el crecimiento, la producción de energía y la eliminación de desechos”(Kennedy, Cuddihy, & Engel-Yan, 2007, p.44). Dicho de otra forma, se estudian los sistemas urbanos como sistemas naturales, donde su ciclo de vida esta denotado por las siguientes etapas: nacimiento, crecimiento, desarrollo y muerte. El metabolismo urbano es considerado un concepto útil y reconocido por la industria, ya que contribuye a la medición de la sostenibilidad de los centros urbanos por medio del entendimiento de sus componentes y los problemas que se asocian a su crecimiento. De igual forma permite la solución de problemas ambientales al identificar el consumo de los recursos naturales y las descargas de desechos por parte de la población en los sistemas naturales. (Díaz Álvarez, 2014)

Considerando la herramienta de análisis del Metabolismo Urbano, es importante evaluar la calidad del agua, a través del índice de calidad del agua (ICA), analizando las descargas que son suministradas al Río por parte de la población. Para lo anterior es importante tener en cuenta los siguientes conceptos:

### **3.2.5 Índice de calidad del Agua (ICA)**

El ICA es un método que a través de un valor numérico permite determinar la calidad de agua de un cuerpo superficial o subterráneo, en un tiempo determinado, considerando ciertos factores ambientales a través de variables simples que permiten el análisis de los principales orígenes de la contaminación, como lo son la materia orgánica y los sólidos suspendidos totales. En caso de agua superficiales, el Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM (2011) afirma que, el ICA “corresponde a una expresión numérica agregada y simplificada surgida de la sumatoria aritmética equiponderada de los valores que se obtienen al medir la concentración de cinco o seis variables fisicoquímicas básicas, en el cuerpo de agua” (p.1).

Los valores obtenidos del indicador se comparan con valores ya establecidos en tablas de interpretación, lo que permite definir de forma descriptiva la calidad de agua en cinco categorías (buena, aceptable, regular, mala o muy mala). Dichos valores comprenden una escala de cero a 1 según el IDEAM (2011), en donde 0.00 y 0.25 representan la categoría muy mala (se presenta también a partir del color rojo), entre 0,26 y 0,50 la categoría mala (color naranja), entre 0,51 y 0,70 la regular (color amarillo), entre 0,71 y 0,9 la aceptable (color verde), y finalmente, entre 0,91 y 1 la categoría buena (color azul).

Como se dijo anteriormente, el ICA se calcula con la medición de diferentes variables. En el caso de Colombia, desde el 2005, este indicador se ha medido en las corrientes superficiales, estudiando 5 variables que son: oxígeno disuelto, sólidos suspendidos totales, demanda química de oxígeno, conductividad eléctrica y pH Total (IDEAM, 2011). Sin embargo, para determinar el ICA, también es posible tener en cuenta factores como la demanda biológica de oxígeno, coliformes fecales, fósforo total, nitrógeno total, tensoactivos, grasas y aceites.

Por el alcance del proyecto, los factores o variables consideradas para determinar el ICA del Río Pance, son:

### **3.2.5.1 Demanda biológica de Oxígeno (DBO)**

La DBO se refiere al oxígeno disuelto y al que es requerido por los organismos para lograr la descomposición aeróbica (en presencia de aire) de la materia orgánica (concentración de un contaminante en el caudal de un lugar determinado) presente en el agua. En efecto, las cargas de DBO corresponden a la cantidad de oxígeno en masa (miligramos, gramos, kilogramos, toneladas, etc.) que se requiere para degradar materia orgánica, tanto por la vía biológica como por la química, en un tiempo establecido, ya sean en minutos, horas, días o años. (ORARBO, n.d.).

### **3.2.5.2 Sólidos Suspendidos Totales (SST)**

Los SST, son el material particulado que se encuentra suspendido en las corrientes de agua superficial y/o residual. Según, La Comunidad Andina -CAN (2008),

“Los SST es la cantidad de residuo retenido en un filtro de fibra de vidrio con tamaño de poro nominal de un micrón y hace referencia al material particulado que se mantiene en suspensión en las corrientes de agua superficial y/o residual”. (p.4)

Este indicador permite evaluar el estado de calidad de agua presente en diferentes cuerpos naturales, como ríos o lagos, así como la calidad de agua disponible para los consumidores en diferentes comunidades. Por lo anterior, este indicador tiene la posibilidad de establecer relaciones con otras variables para definir indicadores ambientales, como el ICA.(CAN, 2008)

### **3.2.5.3 Demanda Química de Oxígeno (DQO)**

Según, El Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM, (2007), la DQO “determina la cantidad de oxígeno requerido para oxidar la materia orgánica en una muestra de agua, bajo condiciones específicas de agente oxidante, temperatura y tiempo”. (p.2). Dicho indicador tiene como finalidad, establecer la eficacia de los procesos que abarcan el tratamiento de los cuerpos de agua, así como controlar el cumplimiento de limitaciones de los vertimientos.

### **3.2.6 Dinámica de Sistemas**

Según Sterman (2000), la dinámica de sistemas (DS) es un método para mejorar el aprendizaje en sistemas complejos. Es decir, que analiza problemas del mundo real para entender su dinamismo y evolución a lo largo del tiempo. Para Jay Wright Forrester, considerado como el padre de la dinámica de sistemas, esta se ocupa del estudio de cómo las cosas cambian en el tiempo, utilizando programas computacionales de simulación para explicar el comportamiento de los sistemas sociales y físicos del mundo. Asimismo, DS busca proporcionar políticas de toma de decisiones con objeto de mejorar situaciones de complejidad (Ramage & Shipp, 2009).

De igual forma, “el objetivo básico de la Dinámica de Sistemas es llegar a comprender las causas estructurales que provocan el comportamiento del sistema”

(García, 2003,p.22). Lo anterior, se logra a través del planteamiento de una hipótesis dinámica que involucra las variables esenciales, los niveles y flujos de acumulación, y sus interacciones en el tiempo. Dicha hipótesis es formulada en un modelo de simulación, que es validado por medio de diferentes pruebas, con el fin de determinar si se refleja la realidad del sistema en cuestión.

Por consiguiente, para entender y comprender un sistema dinámico, es necesario representar las estructuras mentales sobre la causa raíz del problema, en modelos formales y métodos de simulación, obteniendo así información útil y configurando políticas de mejora para aplicarlas al comportamiento dinámico del sistema (Sterman, 2000).

Para capturar la estructura de los sistemas, este enfoque brinda varias herramientas de diagramación, que serán abordadas para entender el sistema complejo del Río Pance, estas son según Sterman (2000):

- **Diagrama de subsistemas:** presentan de forma gráfica la arquitectura general del modelo. Cada subsistema determina los límites del modelo y la definición de las variables endógenas y exógenas.
- **Diagrama Causal:** Según García (2003) “es un diagrama que recoge los elementos claves del sistema y las relaciones entre ellos” (p.25). Es decir, se presenta una estructura de retroalimentación sobre los vínculos de causa efecto entre las variables clave.
- **Diagrama de niveles y flujos (Stocks and Flows):** Considera el comportamiento dinámico del sistema al determinar el nivel y la estructura de los flujos del sistema. Estos representan entradas, acumulación y salidas del sistema.

### 3.3 Contribución Intelectual o Impacto del Proyecto

La gestión del riesgo es un componente fundamental para la ordenación de cuencas hidrográficas y, en general, para la gestión integral del territorio (Mario, Rodríguez, Paola, & Calderón, 2017), por tal razón, la realización de este proyecto busca proporcionar un análisis del impacto que causan diferentes factores, como lo son, el crecimiento poblacional y la contaminación en la dinámica de la cuenca del Río Pance. Lo anterior, con el fin de evitar el riesgo de que esta se convierta en un vertedero y no sea sostenible para la población y el ambiente. Dado que la situación abordada refleja un sistema complejo, la utilización de Dinámica de Sistemas (DS), una herramienta basada en el pensamiento sistémico, resulta ser muy útil para plantear diferentes escenarios plausibles, donde se evalúe y analice el comportamiento del Río, así como para establecer el diseño de distintas políticas que aporten a la mitigación y prevención de la problemática.

De igual forma, a las partes involucradas beneficiarias de este estudio, que son la Comuna 22; quienes dependen de la cuenca como única fuente que los abastece de agua, y las entidades reguladoras del río, que son el DAGMA, la CVC y la Alcaldía del Valle, se les aporta un análisis holístico de la situación actual y futura

de la dinámica de la cuenca, con el fin de que se realice una buena gestión de la misma preservando la sostenibilidad a largo plazo tanto del ecosistema como del recurso.

Por último, desde la perspectiva de la Ingeniería Industrial, la implementación de DS aporta una percepción sistémica del mundo real y la visualización de su dinámica en diferentes aspectos, con el fin de entender cómo se comportan sistemas complejos a través del tiempo; considerando así, el estudio de la dinámica de las cuencas hídricas, de tal manera que se evidencian otros campos en donde las herramientas o metodologías utilizadas en Ingeniería, como el pensamiento sistémico, son aplicables y útiles en diferentes situaciones.

## 4 Metodología

Los objetivos del proyecto se abordaron bajo el enfoque de Dinámica de sistemas propuesto por Sterman (2000), este brinda una serie de pasos necesarios para el planteamiento y formulación del modelo a desarrollar. Dicha metodología, permitió identificar los límites y el alcance del modelo sobre la evaluación de la sostenibilidad del Río Pance, así como también las iteraciones que ocurren dentro de cada fase o paso del proceso. El siguiente diagrama muestra el proceso de modelado que se usó para analizar el sistema en cuestión.

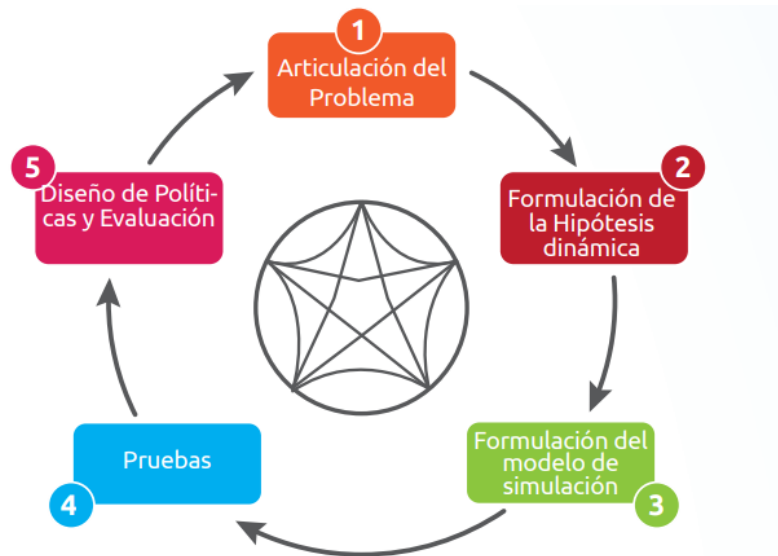


Ilustración 3. Diagrama pasos del proceso de modelado.  
Fuente: (Sterman,2000).

### 1. Articulación del problema

Permitió realizar la selección y contextualización del problema a considerar, que hace referencia a la posibilidad de que el Río Pance no sea sostenible, por factores externos que aumenten el riesgo de convertirlo en un vertedero. Para determinar y apoyar el propósito del modelo, se identificaron las variables claves a analizar, como lo son: crecimiento urbano y los diferentes tipos de vertimientos; asimismo se evaluaron las interacciones que estas presentan.

Con el fin de encontrar información pertinente y relacionada con el proyecto, se realizaron búsquedas y revisión bibliográfica, que permitió ampliar el conocimiento sobre conceptos y estudios anteriores, otorgando claridad sobre la dinámica que presenta el sistema. Lo anterior, con objeto de establecer patrones de comportamiento que permitieron interpretar como se desarrolla el modelo a lo largo del tiempo y como se da su evolución. Por otro lado, se adquirieron conocimientos técnicos con respecto a las herramientas que brinda la Dinámica de sistemas para posteriormente poder desarrollar y evaluar la utilidad del modelo.

Por último, se determinó un horizonte de tiempo suficiente de 20 años, para establecer todas las variables que puedan afectar el modelo, considerando su efecto en los posibles resultados de la simulación.

## **2. Formulación de la hipótesis dinámica**

Para comprender el comportamiento de la problemática analizada, fue necesario formular una hipótesis dinámica que permitiera plantear la estructura del modelo y desarrollar una teoría funcional, es decir explicar el sistema complejo del Río Pance, en términos de flujos y niveles, subsistemas, retroalimentaciones, limitaciones e interacción de las variables tanto exógenas como endógenas. Para representar dichos datos, se utilizaron algunas técnicas y herramientas de diagramación como lo son el diagrama de subsistemas, diagrama causal y el mapa de flujos y niveles. Con lo anterior, se logró entender desde una perspectiva interna las causas originales del problema, los vínculos entre cada efecto, las acciones que caracterizan el sistema general y las limitaciones del modelo.

## **3. Formulación del modelo de simulación**

Los datos necesarios para las diferentes etapas ya mencionadas, fueron recolectados a partir de diferentes fuentes: Páginas web con contenido relacionado al Río Pance, informes y bases de datos de entidades como DAGMA, CVC, Alcaldía (Cali Cómo Vamos), estudios previos de aplicación de dinámica de sistemas realizados en distintas universidades y divulgaciones en revistas académicas.

Dichos datos son la entrada principal para los siguientes pasos, por lo que fue necesario realizar su análisis y tratamiento. Lo anterior, por medio de herramientas de inferencia estadística, programas de análisis estadístico, estructuración y simulación en el software especializado Vensim y análisis de sensibilidad otorgados por el programa.

Con la información recolectada, se configuró un modelo formal en la herramienta de modelaje Vensim, en el cual, se formularon las ecuaciones, relaciones de comportamiento, parámetros y condiciones iniciales relacionadas con la estructura y variables de la situación abordada.

## **4. Pruebas**

Las pruebas permitieron evidenciar si el comportamiento del modelo simulado reflejaba el sistema real; en busca de que las ecuaciones formuladas tuvieran una consistencia dimensional. A partir de entonces, se sometió el modelo a diferentes validaciones que permitieron garantizar la coherencia de los datos de entrada y las ecuaciones, relacionando el impacto de los vertimientos sobre el nivel del caudal y la calidad del agua. De manera que, para determinar la utilidad del modelo, este fue calibrado bajo las condiciones deseadas, con objeto de simular los patrones de comportamiento de la dinámica asociada al Río Pance, y obtener resultados por medio del análisis de sensibilidad para reconocer los límites del modelo y sus resultados. Estas pruebas se realizaron a medida que se desarrolló el modelo, verificando que no existiera inconsistencia en las unidades de las diferentes variables y que los resultados se comportaran como la dinámica real.

## **5. Diseño de políticas y evaluación**

Una vez realizadas las pruebas de validación del modelo bajo las condiciones iniciales del sistema, surgieron otras condiciones ambientales que se podían abordar, como lo es el análisis del sistema de vertimientos y los límites establecidos sobre el depósito de estas sustancias al río. Se determinó como dicho factor podía ser representado en el modelo y representar la realidad. De modo que, con la información obtenida de los diferentes escenarios, se pudieran establecer recomendaciones de políticas, orientadas en la importancia de la preservación y sostenibilidad del recurso hídrico del Río Pance, teniendo en cuenta las variables de crecimiento urbano y descargas orgánicas que se analizaron en el modelo. Las políticas propuestas buscan generar un impacto positivo en la conservación futura de la cuenca, con objetivo de ser aplicadas y divulgadas a las entidades encargadas de proteger y mantener las condiciones ambientales del Río.

## **5 Descripción del modelo**

En el proyecto de investigación, se realizó un artículo académico donde se exponen los diferentes diagramas requeridos, el respectivo análisis de los resultados y las conclusiones y recomendaciones que se plantean. Dicho artículo se presenta después de la bibliografía. (Ver Anexo 1)



## BIBLIOGRAFÍA

- Alcaldía de Santiago de Cali. (2017). *Cali en Cifras*. Santiago De Cali.
- ATC-Innova. (2007). Recursos de Vensim en español. *Vensim®*, 19. Retrieved from <http://atc-innova.com>
- Centro de Investigaciones en Ingeniería Ambiental- Universidad de los Andes. (n.d.). Concentraciones de referencia para los vertimientos industriales realizados a la red de alcantarillado y de los vertimientos industriales y domésticos efectuados a cuerpos de agua de la ciudad de Bogotá. Retrieved from <https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/77389/1/TFG-Tanash-Utamchandani-Tulsidas.pdf>
- CIDEAD. (2010). Población 5. *Geografía e Historia ESO*, 1–18.
- Comunidad Andina -CAN. (2008). Manual de Estadísticas Ambientales Andinas.
- Corporación Autónoma Regional - CAR. (2000). Concesión de Aguas Superficiales. Retrieved from <https://www.car.gov.co/vercontenido/1162>
- CVC. (2007). Balance Oferta – Demanda De Cuenca del Río Lili, (figura 1), 1–12.
- Dagma. (2018). *Departamento Administrativo De Gestion Del Medio Ambiente – Informe De Caracterización De Aguas E Índice De Calidad De Agua De Los Ríos Aguacatal , Cali , Cañaveralejo , Lili , Meléndez Y Pance* (Vol. 2012).
- DAGMA. (2009). Agenda Ambiental Comuna 22, 394–414.
- DAGMA. (2017). Informe De Caracterización De Aguas E Índice De Calidad De Agua De Los Ríos Aguacatal , Cali , Cañaveralejo , Lili , Meléndez Y Pance, 2017, 1–62.
- Departamento Administrativo de Gestión del Medio Ambiente – DAGMA. (2005). Objetivos de calidad del Recurso Hídrico en el área urbana del municipio de Santiago de Cali.
- Departamento Administrativo de Planeación. (n.d.). Proyecciones de la población del municipio de Santiago de Cali 2006-2036.
- Díaz Álvarez, C. J. (2014). Metabolismo Urbano: herramienta pra la sustentabilidad de las ciudades. *Revistas UNAM*, 2(16). <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.22201/ceiich.24485705e.2014.2.46524>
- Duran-Encalada, J. A., Paucar-Caceres, A., Bandala, E. R., & Wright, G. H. (2017). The impact of global climate change on water quantity and quality: A system dynamics approach to the US–Mexican transborder region. *European Journal of Operational Research*, 256(2), 567–581. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2016.06.016>

- EL TIEMPO. (2017). Aguas del río Pance de Cali pasan a piscinas y acueductos. Retrieved from <https://www.eltiempo.com/colombia/cali/aguas-del-rio-pance-de-cali-pasan-a-piscinas-y-acueductos-106908>
- Flechas, J. J. (2006). Río Pance, crónica de una muerte anunciada. Retrieved from <http://www.semillas.org.co/es/ro-pance-crnica-de-una-muerte-anunciada>
- Forrester, J. (n.d.). Modelado en dinamica de sistemas. *Dinámica de Sistemas*.
- García, J. M. (2003). *Teoría y ejercicios prácticos de Dinámica de Sistemas*. (J. M. García, Ed.). Zaragoza (España). Retrieved from [https://books.google.com.co/books?id=RQ5BDwAAQBAJ&printsec=frontcover&dq=dinámica+de+sistemas&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwi9m8emqP\\_dAhWMKFAKHTggB64Q6AEIKDAA#v=onepage&q=dinámica+de+sistemas&f=false](https://books.google.com.co/books?id=RQ5BDwAAQBAJ&printsec=frontcover&dq=dinámica+de+sistemas&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwi9m8emqP_dAhWMKFAKHTggB64Q6AEIKDAA#v=onepage&q=dinámica+de+sistemas&f=false)
- Giraldo, Luisa; Hernández, María; Osorio, J. (2015). La Tragedia Del Terreno Común, Un Arquetipo Sistémico Ilustrado a Través Del Uso De La Tierra En Actividades Agropecuarias. *Escuela de Ingeniería Industrial, Facultad de Ingeniería, Universidad Del Valle*, 19. Retrieved from <http://bibliotecadigital.univalle.edu.co/bitstream/10893/8359/1/02-A02-p13-19.pdf>
- Graedel, T. ., & Allenby, B. . (2003). *Industrial Ecology*. (Pearson Education, Ed.) (Second). New Jersey.
- IDEAM. (2010). Capítulo 6. Calidad del agua superficial en Colombia. *Ideam*. Retrieved from <https://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/Bvirtual/021888/CAP6.pdf>
- Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM. (2007). Demanda Química de Oxígeno. *Instituto de Hidrologia, Meteorología y Estudios Ambientales*. Retrieved from <http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38155/Demanda+Química+de+Oxígeno..pdf/20030922-4f81-4e8f-841c-c124b9ab5adb>
- Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM. (2011). Hoja metodológica del indicador Índice de calidad del agua (Versión 1,00). *Sistema de Indicadores Ambientales de Colombia - Indicadores de Calidad Del Agua Superficial*, 1–10.
- Kennedy, C., Cuddihy, J., & Engel-Yan, J. (2007). The Changing Metabolism of Cities. *Journal of Industrial Ecology*, 11(2), 43–59.
- Mabel Andrea Zabala Pérez. (2011). ANÁLISIS DE ESTRATEGIAS DE DESARROLLO SOSTENIBLE A NIVEL DE UNA CUENCA HIDROGRÁFICA: APLICACIÓN DE LA DINÁMICA DE SISTEMAS AL CASO DE LA CUENCA DEL RÍO YUMBO.
- Mario, J., Rodríguez, V., Paola, A., & Calderón, A. (2017). Metodología para el análisis de vulnerabilidad ante amenazas de inundación , remoción en masa y

flujos torrenciales en cuencas hidrográficas Methodology for analysis of vulnerability for flood hazards , mass movements and watershed torrent flow Ciencia e, 109–136. Retrieved from <https://revistas.unimilitar.edu.co/index.php/rcin/article/view/2309/2495>

Newell, J. P., & Cousins, J. J. (2015). The boundaries of urban metabolism: Towards a political-industrial ecology. *SAGE*, 39, 702–728. <https://doi.org/10.1177/0309132514558442>

Niño, N., & Restrepo, G. A. (2016). Sostenibilidad Del Río Pance Como Recurso Hídrico: Una Aproximación Desde La Dinámica De Sistemas, (Cvc).

Norberto, C. V., Tabares, B. C., Gladys, W. V., Guevara, M. L. C. N. R., Zeneire, F. A., Gloria, C., ... Rodríguez, D. C. (2016). Estrategia de Manejo Ambiental de la Zona Media y Baja de la Subcuenca del Río Pance, 33.

ORARBO. (n.d.). Carga Contaminante de Materia Orgánica. Retrieved from <http://www.orarbo.gov.co/esm/indicadores?id=1297&v=l>

Palladino, A. C. (2010). Introducción a la demografía., 64, 382. <https://doi.org/10.1157/13068212>

Periódico El País. (2015). Seis de los siete ríos de Cali tienen baja calidad de agua: Personería. Retrieved from <https://www.elpais.com.co/cal/seis-de-los-siete-rios-de-tienen-baja-dad-de-agua-personeria.html>

Periódico El País. (2018). ¿Cuántos ríos tiene Cali?, descúbralo en esta infografía. Retrieved from <https://www.elpais.com.co/cal/cuantos-rios-tiene-cali-descubralo-en-esta-infografia.html>

Ramage, M., & Shipp, K. (2009). *Systems Thinkers*. (Springer, Ed.). Londres.

Rodríguez, C. (2015). Los turistas no son la única amenaza del río Pance. Retrieved from <http://blogs.elespectador.com/actualidad/el-rio/los-turistas-no-son-la-unica-amenaza-del-rio-pance>

Sánchez-román, R. M., Folegatti, M. V., Orellana González, A. M. G., Silva, R. T. da, Guadalupe, A. M., González, O., & Teixeira, R. (2009). Dynamic systems approach assess and manage water resources in river basins. *Scientia Agricola*, 66(4), 427–435. <https://doi.org/10.1590/S0103-90162009000400001>

Soliz, L. (2016). Modelo de simulación para la identificación y cuantificación de los impactos ambientales producidos en el río Suches.

Sterman, J. D. (2000). *Business Dynamics: Systems thinking and modeling for a complex world*. (McGraw-Hill, Ed.), *Business Dynamics: Systems thinking and modeling for a complex world*.

Torre-Marín, C., Granados, S., Herrera, R., & Martínez, R. (2009). Ecología industrial y desarrollo sustentable. *Ingeniería*, 13(1), 63–70.

Universidad Nacional Autónoma de México. (n.d.). Dinámica y retroalimentación. Retrieved from <https://www.coursera.org/lecture/pensamiento-sistemico/dinamica-y-retroalimentacion-9dChT>

Valero Juan, L. F. (2009). Epidemiología General y Demografía sanitaria, 0, 1–8.

Vallin, J. (2010). La Demografía. *Construction*, 3246(6), 1–7. <https://doi.org/10.1074/jbc.M109.090936>

Wu, J. (2014). Urban ecology and sustainability: The state-of-the-science and future directions. *Landscape and Urban Planning*, 125, 209–221. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2014.01.018>

## **Anexo 1. Artículo Académico**

# RÍO PANCE: CRÓNICA DE UNA MUERTE ANUNCIADA

ANGIE V. PÉREZ, ISABELLA SALAZAR & FERNANDO A. ARENAS

*Ingeniería Industrial, Universidad Icesi  
Cali, Colombia*

## RESUMEN

En la actualidad, el río Pance es uno de los pocos ríos con potencial hídrico que le queda a la ciudad de Cali, sin embargo, situaciones como el incremento de proyectos urbanísticos, el aumento de captaciones y la contaminación, amenazan hoy por hoy la sostenibilidad del río. En consecuencia, este trabajo tiene como objetivo evaluar que tan sostenible será el río Pance en un periodo de 20 años, teniendo como base el indicador Índice de Calidad del Agua (ICA), que calcula la calidad del agua integrando varios factores como lo son el aumento de captaciones, el crecimiento poblacional y el incremento de vertimientos. Lo anterior se lleva a cabo por medio de un modelo de simulación de la situación actual, empleando Dinámica de Sistemas, método que permite analizar y entender el dinamismo de problemas reales a través del tiempo. El modelo planteado en el software Vensim, muestra las interacciones de los diferentes sistemas que aportan a la dinámica abordada, que son el sistema legal, hídrico, poblacional y de vertimientos. Los resultados obtenidos del modelo, según el planteamiento de diferentes escenarios donde varía el factor de consumo, indican que, si no existe un control de la dinámica actual del río, la calidad del agua de este, tenderá a encontrarse en un estado de deterioro, puesto que el índice de calidad del agua podrá tomar valores menores o iguales a 0.5 asociados a una categoría mala o muy mala, lo que trae consigo, en un horizonte de 20 años, la pérdida de su capacidad y potencial para abastecer las necesidades derivadas del recurso hídrico.

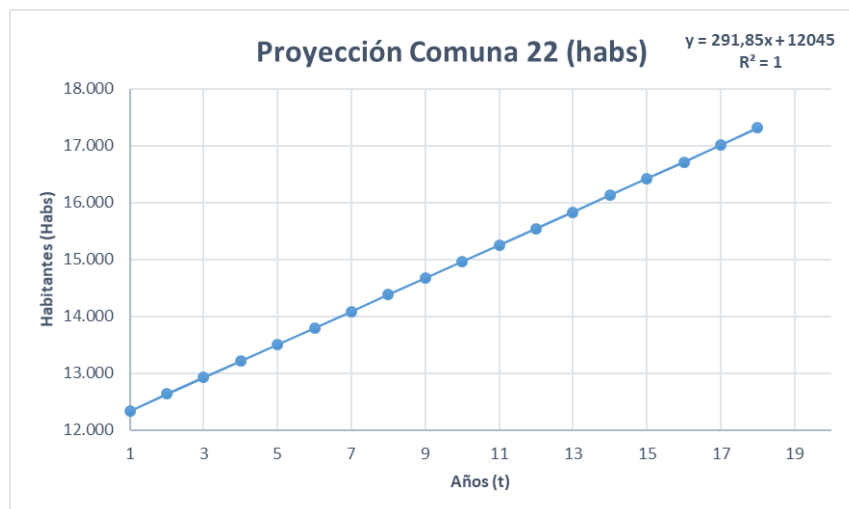
**Palabras claves:** Dinámica de sistemas, sostenibilidad, índice de calidad del agua, crecimiento urbano, vertimientos.

## 1 INTRODUCCIÓN

El Río Pance, nace en el cerro Pance, ubicado en el Parque Nacional Natural de los Farallones de Cali, a 4.200 m.s.n.m. La cuenca se encuentra en el sur occidente del Municipio de Santiago de Cali, sobre la Cordillera Occidental [1] con “una longitud de 27,38 k, un área de 72,10 m<sup>2</sup> y un caudal aproximado de 4,85 m<sup>3</sup>/s”[2]. Debido a su extensión y potencial hídrico, este se ha convertido en la principal fuente de consumo de agua para la población ubicada alrededor de la cuenca. Aunque por años la cuenca del río Pance, se ha proyectado como un oasis de reposo, hoy sus aguas proyectan un panorama desfavorable, amenazado por el crecimiento poblacional en la zona que trae consigo la llegada de proyectos urbanísticos que vienen deteriorando la diversidad natural del río. Esto, sumado a la captación masiva de agua y los vertimientos y/o desechos depositados no autorizados.

Hace un tiempo atrás, por lo menos 50 años, la ciudad de Cali, en especial la población con mayor poder adquisitivo empezó a expandirse hacia la zona sur, específicamente hacia el sector de Pance conformado por la comuna 22 [3]. Lo anterior provoca la construcción de diferentes unidades residenciales y casas campestres en la zona.

Según un informe estadístico del Departamento Administrativo de Planeación Municipal, que muestra las proyecciones de la población en número de habitantes de la comuna 22, desde el año 2006 hasta el 2036; se logra establecer que existe una relación directa entre cada año y el número de habitantes ubicados en esta zona, pues, al transcurrir los años se presenta un crecimiento de población con respecto al anterior, obteniendo un porcentaje de crecimiento promedio de 2,41% para los treinta y dos años proyectados; el anterior comportamiento se observa en el Gráfico 1.



**Gráfico 1. Proyección de población comuna 22 (2019-2036). Fuente: Autores.**

Para el año 2016 la proyección de población en la comuna 22 era equivalente a 11.453 habitantes, asimismo, en ese año se otorgaron 43 licencias de construcción, con un total de 157.014 m<sup>2</sup> de área aprobada para construir, de la que 147.140 m<sup>2</sup> hace referencia a construcción para vivienda. De igual forma, se aprobó la construcción de 609 viviendas [4], lo que trajo consigo un crecimiento urbano considerable en la zona y mayor demanda de recursos debido a su atractividad y valoración como área potencial para la construcción de proyectos de urbanización.

Por otra parte, para lograr la captación del recurso hídrico del río y abastecer el consumo de la comunidad, la entidad gubernamental competente, otorga concesiones que hacen referencia al derecho de explotación o utilización del caudal del río. Dentro del marco legal, en el año 2017, 420 predios tuvieron la concesión aprobada ya sea por la CVC (perímetro rural) o por el DAGMA (perímetro urbano) para obtener el líquido vital, de estos 21 usuarios corresponden a la comuna 22 [5]. Debido a que el crecimiento urbano genera mayor demanda del recurso hídrico, las solicitudes por otorgamiento de concesiones también presentan una tendencia de crecimiento, con el fin de lograr abastecer dicha necesidad y aprovechar el potencial hídrico del río.

Por lo anterior, se puede evidenciar que situaciones como la dinámica poblacional que enfrenta el sector, que a su vez trae consigo el incremento de los proyectos de urbanización, y los desechos y vertimientos provenientes de actividades humanas que se descargan al río, se relacionan directamente con la sostenibilidad del Río Pance. Ahora bien, situaciones similares han afectado el estado biológico y natural de otros ríos pertenecientes a la ciudad de Cali, como lo son los ríos Lili, Cañaveralejo y Meléndez. Ríos víctimas de contaminación por planes de ordenamiento territorial, desechos de obras de construcción, explotación minera, aguas residuales y basuras, que a lo largo del tiempo han deteriorado la calidad de sus aguas y su funcionalidad.

Ahora bien, considerando la situación planteada, se da origen a la pregunta de investigación, ¿Cuál es el riesgo de que el Río Pance se convierta en un vertedero y no sea sostenible en un horizonte de 20 años, para lograr abastecer su demanda ambiental y consumo poblacional, replicando así la historia de los demás ríos de la ciudad? La pregunta anterior, se pretende responder a partir de la simulación de diferentes escenarios de consumo, evaluando el Índice de Calidad de Agua (ICA) del río durante un periodo de 20 años, permitiendo de tal forma, realizar la comparación de los valores obtenidos frente al ICA actual del Río Cañaveralejo, uno de los más contaminados de la ciudad.

La aplicación de la Dinámica de Sistemas ha permitido en diferentes estudios la gestión de la toma de decisiones enfocadas a la sostenibilidad de cuencas hidrográficas a nivel nacional e internacional. Duran-Encalada, Paucar-Caceres, Bandala, & Wright [6] realizan un modelo que estudia el impacto del crecimiento poblacional y del cambio climático en la cuenca del Río Bravo en México, buscando evaluar políticas y decisiones que tienen como objetivo establecer patrones de consumo de agua más razonables y desarrollar sistemas eficientes de distribución de agua en áreas urbanas. Soliz [7], propone un modelo de simulación para la identificación y cuantificación de los impactos ambientales en el río Suches, ubicado en la frontera política entre Perú y Bolivia; dicho modelo basado en el método de dinámica de sistemas, evalúa las principales causas de contaminación derivadas de la inadecuada gestión y planificación municipal. Sánchez-Román, Vinicius y Orellana [8] evalúan la disponibilidad de los recursos hídricos en las cuencas de los ríos Piracicaba, Capivari y Jundiá, en Brasil, a partir de un modelo que calcula el suministro de agua, demandas del recurso y cargas de contaminación de diferentes consumidores, considerando simulaciones de 50 años, con el fin de ayudar al Comité de dichas Cuencas. A nivel nacional,

Mabel Andrea Zabala Pérez [9] realiza un estudio para establecer la factibilidad de diferentes políticas para el manejo de la cuenca del Río Yumbo, considerando la integración de factores ambientales, económicos y sociales. Finalmente, Niño & Restrepo [10], evalúan la sostenibilidad de la cuenca del Río Pance, considerando un modelo que describe las interacciones entre los sistemas demográfico, hidrológico y legal de la cuenca del río.

Este estudio se realiza bajo la perspectiva del metabolismo urbano, que permite entender los sistemas urbanos como un sistema natural, donde se analiza su ciclo de vida y las diferentes entradas y salidas al sistema, por lo que se realizó un modelo para analizar el impacto que tiene el incremento de usuarios que captan agua del río ligado al crecimiento poblacional y las concentraciones de los diferentes vertimientos depositados, en la sostenibilidad futura del río Pance. Para esto, fue necesario utilizar datos relacionados con proyecciones de la población de la comuna 22, niveles de caudal del río Pance, número de captaciones de agua y los principales tipos vertimientos per capita. Con lo anterior, se obtuvieron unos resultados preliminares que permitieron entender el comportamiento del ICA en un periodo de 20 años. De igual forma, dado que se modeló el caudal del río como una variable estocástica, se llevaron a cabo simulaciones Montecarlo con el fin de hallar la probabilidad de que el ICA del río en un periodo de 20 años sea menor o igual a 0.5, presentando una calificación mala de la calidad del agua.

La gestión del riesgo es un componente fundamental para la ordenación de cuencas hidrográficas y, en general, para la gestión integral del territorio [11]. Dicho lo anterior y teniendo en cuenta que Pance es un río que en los últimos años ha presentado una calidad buena en comparación a los demás ríos de Cali, se hace importante realizar una buena gestión del mismo para su preservación tanto en el presente como en el futuro. Lo anterior, refleja el propósito principal y la importancia de estudiar la problemática planteada.

Los resultados obtenidos, muestran que, con el consumo actual por parte de los diferentes usuarios, en un periodo de 20 años, existe la posibilidad de que la calificación del ICA asociada al río se encuentre en la categoría mala, es decir que no sea sostenible. Sin embargo, si se establecen políticas que limiten el número de usuarios autorizados para captar agua del río y asimismo se regula el consumo por parte de dichos usuarios, el río en un periodo de 20 años será sostenible.

En las siguientes secciones de este artículo se expone la metodología que se utilizó, asimismo se describe el procedimiento de la documentación del modelo, que incluye detalladamente los datos de entrada como las ecuaciones de cada una de las variables utilizadas. De igual forma, se muestran y discuten los resultados obtenidos del modelo y los diferentes escenarios, por último, se exponen las conclusiones y recomendaciones.

## 1 METODOLOGÍA

Los sistemas hídricos son considerados como sistemas complejos, debido a que comprenden una serie de variables que pueden afectar directamente su comportamiento. Es por esta razón, que se emplea la teoría de Dinámica de Sistemas para evaluar la disponibilidad de los recursos hídricos y generar estrategias enfocadas en su preservación y sostenimiento, es decir, es una herramienta que permite comprender las interconexiones de los diferentes subsistemas que integran al río, donde se definen escenarios de acuerdo a las estrategias planteadas [9]. Por lo anterior, el presente proyecto de grado emplea la metodología de Dinámica de Sistemas expuesta por Sterman [12].

La metodología consta de un proceso compuesto por las siguientes etapas: articulación del problema, formulación de la hipótesis dinámica, formulación del modelo de simulación, pruebas, y diseño de políticas y evaluación. Para evaluar la sostenibilidad del río Pance, se tuvieron en cuenta los subsistemas relacionados e integrados al dinamismo del río, estos son el sistema legislativo, poblacional, hídrico y de vertimientos.

Dentro de las etapas de clarificación del problema y definición de la hipótesis dinámica, se elaboraron esquemas como el diagrama de subsistemas y el diagrama causal, los cuales permiten comprender la complejidad del problema en términos de subsistemas, ciclos de retroalimentación, limitaciones e interacción de las variables involucradas. Seguido a esto, se utilizó la herramienta de diagrama de niveles y flujos con el fin de realizar un esquema general que representa la dinámica analizada bajo el enfoque de entradas y salidas para las variables principales. Con lo anterior, se formuló el modelo de simulación y se recolectaron y trataron estadísticamente los datos necesarios para configurar las ecuaciones y parámetros del modelo en el software especializado Vensim. Asimismo, dicho modelo fue calibrado y validado, para corroborar su consistencia dimensional y coherencia con respecto a la realidad del sistema evaluado.

Por último, se establecieron escenarios de simulación realizando una variación del factor de consumo del recurso hídrico, derivado de las captaciones de agua. De igual forma, se diseñó una política que busca generar un impacto en la conservación futura del río y controlar el consumo de su afluente. Con todo lo anterior, se llevaron a cabo simulaciones Montecarlo, en un horizonte de 20 años, con el fin de realizar un análisis de sensibilidad y obtener la probabilidad de que, en el último año, la calidad del agua del río Pance pueda ser menor o igual a 0.5, valor que representa una calidad mala, es decir, deterioro de las aguas y pérdida de su potencial hídrico.

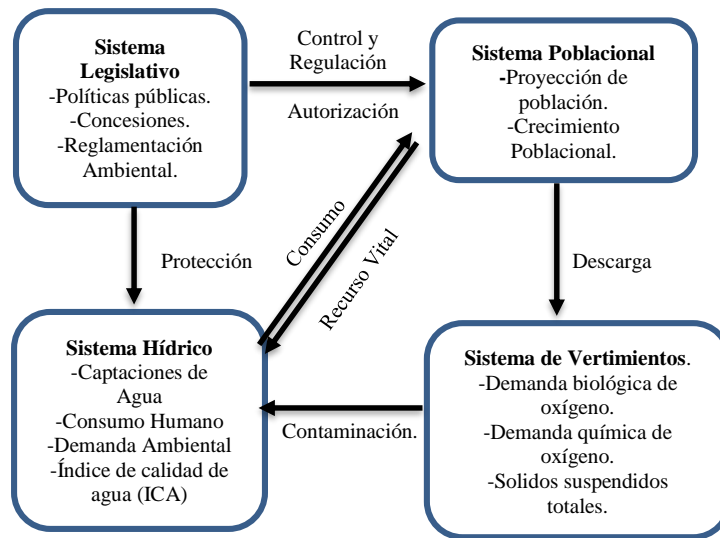


### 3 MODELADO

Según la metodología propuesta por Sterman [12], en primer lugar, se realiza la articulación del problema, es decir, se logra una comprensión y clarificación de la dinámica abordada. Asimismo, se formula la hipótesis dinámica, con el fin de comprender el comportamiento y plantear un esquema o explicación general que muestre la interacción de las variables exógenas y endógenas y sus vínculos de causa y efecto. Para representar dichos análisis y datos, se utilizaron herramientas de diagramación como lo son el diagrama de subsistemas, diagrama causal y el diagrama de niveles y flujos. En segundo lugar, en esta parte del proyecto de investigación, se exhibe el esquema general del modelo de simulación planteado, la parametrización de las ecuaciones, el diseño de la política de control, la explicación de los datos de entrada y de los escenarios de simulación.

#### 3.1 Diagrama de Subsistemas

Este tipo de diagrama es una herramienta que permite identificar los subsistemas principales de la problemática, y la interacción entre cada uno de ellos. En la Figura 1. *Diagrama de subsistemas de la sostenibilidad del Río Pance*, se logra apreciar de forma gráfica la arquitectura general del modelo, la determinación de sus límites y la definición de las variables tanto endógenas como exógenas. Asimismo, se encuentra detallada la descripción de cada subsistema y los componentes que lo conforman.



**Figura 1. Diagrama de subsistemas de la sostenibilidad del Río Pance**  
Fuente: Autores

En la Figura 1, se exponen los siguientes subsistemas:

**Sistema Legislativo:** Este subsistema representa la regulación y control de las entidades encargadas de otorgar concesiones, permisos, autorizaciones y licencias ambientales, para el uso del recurso hídrico.

**Sistema Poblacional:** Representa la relación directa que existe entre el crecimiento urbano, en especial de la comuna 22, con respecto a la necesidad del recurso hídrico para consumo. Este subsistema está relacionado con el sistema hídrico y el legislativo, debido a que el consumo de agua por parte de la población se da gracias a concesiones y permisos otorgadas por entidades públicas.

**Sistema de Vertimientos:** Se refiere a todas las descargas contaminantes depositadas en el río, relacionadas con el uso y consumo del agua.

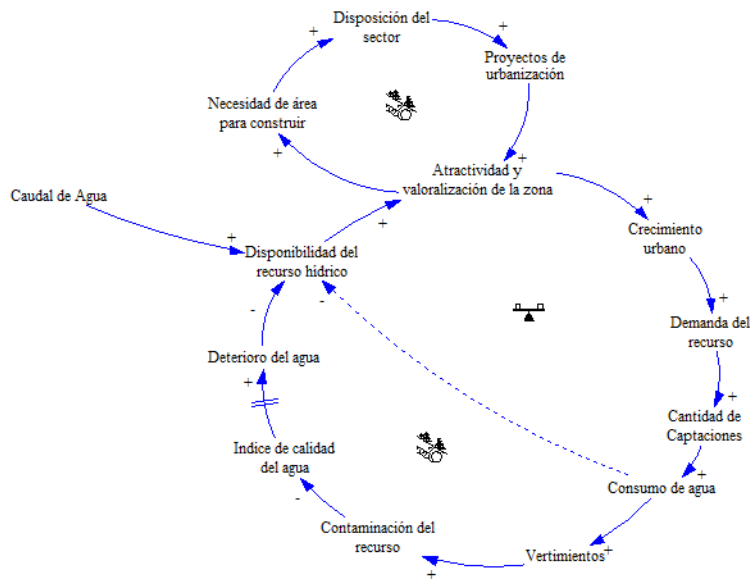
**Sistema Hídrico:** Se refiere a la consideración del agua como recurso vital y fundamental para la población, al igual que su uso para satisfacer necesidades ambientales. Asimismo, engloba a aquellos factores externos que pueden afectar la calidad de del agua superficial, como lo es contaminación por parte de la comunidad.

#### 3.2 Diagrama Causal

La construcción de un diagrama causal permite describir el comportamiento del sistema y realizar una representación gráfica de la estructura del modelo. En esta herramienta, se tienen en cuenta los elementos principales del sistema para representar los ciclos de retroalimentación, entre las relaciones causa-efecto sobre los vínculos de las variables. De igual forma, existen dos tipos de relaciones entre variables, según Sterman, una relación causal positiva (+) hace referencia a que “si la causa aumenta, el efecto aumenta por encima de lo que habría hecho de otro modo, y si la causa disminuye, el efecto disminuye por debajo de lo que habría hecho de otro modo” [12], y del mismo modo, una causal negativa (-) atribuye una relación inversa entre la causa y el efecto.

Dado que dichas relaciones se representan en ciclos de retroalimentación, cabe mencionar que estos hacen referencia a “una cadena cerrada de acciones elementales entre los elementos del sistema”[13], ya sea positiva o negativa. En primer lugar, los ciclos de retroalimentación positiva o también conocidos como ciclos reforzadores, se forman cuando los efectos o salidas de un sistema causan efectos acumulativos en la variable de entrada, es decir, tienden a desarrollar un comportamiento de crecimiento que puede producir el desequilibrio del sistema. Por otro lado, los ciclos de retroalimentación negativa o ciclos compensadores, se generan cuando las salidas causan un efecto estabilizador que contrarresta la variación del sistema, buscando su equilibrio al estar determinado por un objetivo [14].

Para la realización del diagrama causal y la formulación de la hipótesis dinámica sobre la sostenibilidad del Río Pance, se hace uso del arquetipo de tragedia del terreno común, puesto que este, representa de forma significativa el problema actual con respecto a la conservación y manejo de los recursos naturales. Su dinámica establece un recurso en común donde su disponibilidad es limitada, en este caso, se trata del recurso hídrico. De igual forma, se determinan los agentes encargados de agotar y beneficiarse de dicho recurso. Asimismo, engloba un comportamiento de consumo que se traduce en un agotamiento del recurso y una necesidad de esfuerzo por conseguirlo para abastecerse en situaciones futuras y continuar con la dinámica de consumo [15].



**Figura 2. Diagrama Causal sobre la sostenibilidad del Río Pance**  
Fuente: Autores

La Figura 2, es una representación de la dinámica analizada con referente a la sostenibilidad del río Pance, teniendo en cuenta las variables principales del crecimiento urbano y asentamiento en la comuna 22, como su relación con el sistema de vertimientos generados por el uso y consumo del agua. Al establecer la hipótesis dinámica, se tiene que, al presentarse una *Necesidad de área para construir*, relacionada con la dinámica poblacional, se genera una *Disposición del sector*, por diferentes constructoras con el fin de incrementar los *Proyectos de urbanización* y abastecer la demanda de viviendas. Lo anterior, tiene un impacto en la *Atractividad y Valoración de la zona*, puesto que al existir más proyectos de bienes raíces, las personas reconocen al sector como un destino ideal para vivir, debido a que es un sector acogedor, con presencia de diferentes establecimientos comerciales, al igual que también cuenta con una zona campestre y disponibilidad de recursos, en especial, del recurso hídrico. Las variables mencionadas generan un ciclo reforzador, donde se proyecta un crecimiento constante asociado con la proyección de urbanización.

De igual forma, como se ha mencionado anteriormente, dicha *Atractividad y Valoración de la zona*, produce que las personas deseen y decidan asentarse en este sector de la ciudad, lo que genera una aglomeración de población traducido en *Crecimiento Urbano*. Así, al existir mayor población también aumentará la *demanda* y necesidad de los recursos naturales, como lo es en este caso, el recurso hídrico. Esto genera que se aumente la *cantidad de solicitudes de Concesiones* a la autoridad competente, con el fin de lograr la captación del agua del río. Este comportamiento se relaciona con un aumento directo en el consumo de agua del río como recurso vital, afectando directamente la disminución de la disponibilidad del recurso hídrico. Este sistema presenta un ciclo compensador, debido a que expone la evolución del comportamiento de consumo a largo del tiempo, si se continua con la dinámica planteada. Por otro lado, dicho consumo de agua genera una cantidad de vertimientos que son depositados en el río, incrementando así la contaminación del recurso y afectando el índice de calidad de sus aguas, al presentarse mayor concentración de los tipos de vertimientos asociados. Lo anterior, ocasiona que, a lo largo del tiempo, se presente un deterioro del agua, lo que se traduce en la reducción de disponibilidad del recurso

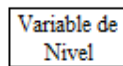
hídrico como también del caudal Río. Este último sistema, presenta un ciclo reforzador, ya que cada salida se convierte en un efecto que se acumula en la siguiente entrada, generando así un comportamiento de crecimiento en cuestión de generación de vertimientos y deterioro del agua.

### 3.3 Diagrama de Niveles y Flujos

El diagrama de Niveles y flujos, en general, representa la estructura de un sistema, considerando información más detallada de la que se emplea en el Diagrama Causal. Lo anterior con el fin de comprender aún más la conducta de un sistema, esto debido a que se consideran variables de niveles y flujos, en donde los flujos son las causas que hacen cambiar el sistema y los niveles, son las variables de estado, en donde se acumulan o integran los flujos, lo que significa que los flujos modifican los niveles, y que estos últimos cambian continuamente con el tiempo [16].

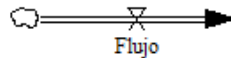
En un diagrama de Niveles y Flujos también hacen presencia conceptos o variables intermedias, que ayudan a la estructuración de la dinámica del sistema evaluado. Estas variables, son denominados como variables auxiliares y de igual forma que los flujos, pueden cambiar instantáneamente en respuesta a cambios en los niveles [16]. Es importante resaltar, que, dentro de la Dinámica de Sistemas, las variables de Niveles y Flujos, tienen una representación particular:

- Los niveles, se representan en un rectángulo (Ver Figura 3), simulando un contenedor que almacena el contenido del nivel alterado por los flujos.



**Figura 3. Representación de la variable de Nivel**  
Fuente: Autores

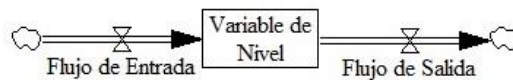
- Los flujos, son flechas que entran y salen de la variable de nivel (Ver Figura 4). En el caso de las flechas que entran, representan los flujos de entrada que adicionan información a la variable de nivel. Por otro lado, las flechas que salen, son los flujos de salida que restan información de la variable de nivel.



**Figura 4. Representación de los flujos**  
Fuente: Autores

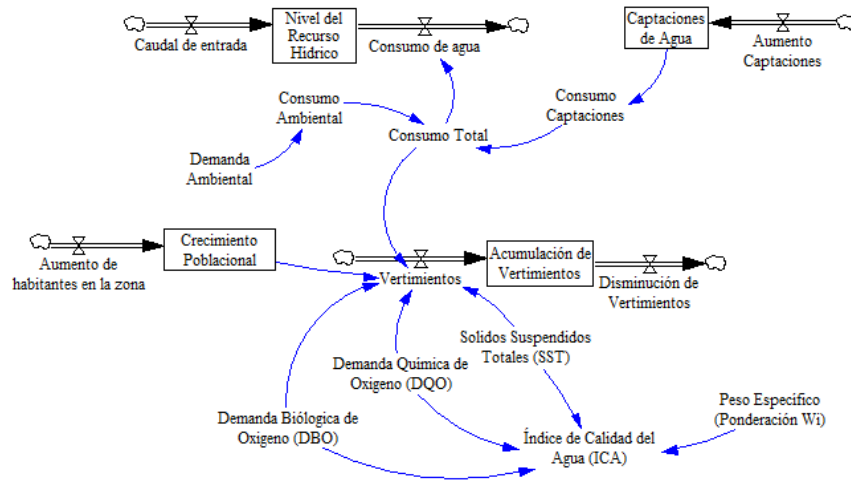
La válvula que se encuentra en la flecha del flujo, se encargará de controlarlos. Por último, la nube que inicia en la flecha, representa que un nivel puede alimentarse a través de un flujo desde una fuente exterior al sistema, dicha nube también puede estar finalizando la flecha, que representa que un nivel puede vaciarse sobre un sumidero exterior al sistema. Es importante mencionar, que tanto la fuente como el sumidero, se suponen de capacidad infinita sin limitar los flujos [13].

La Figura 5 presenta la estructura general de un Diagrama de Niveles y Flujos y está dada de la siguiente forma:



**Figura 5. Estructura general de un diagrama de nivel y flujo**  
Fuente: Autores

Ahora bien, para describir la dinámica que presenta actualmente el río Pance, se elabora un esquema general de niveles y flujos, donde se relacionan las variables del nivel de recurso hídrico, el consumo de captaciones de agua derivado del crecimiento poblacional y los vertimientos generados por la población. Las variables anteriormente mencionadas, afectan directamente el índice de calidad del agua del río donde se consideran cada una de las concentraciones de los diferentes tipos de vertimientos (ver Figura 6).



**Figura 6. Diagrama de Niveles y Flujos sobre la sostenibilidad del Río Pance.**  
Fuente: Autores

A continuación, se expone un explicación detallada de las variables que conforman el diagrama:

- Nivel del Recurso Hídrico (NRH): es una variable de nivel que representa el caudal del agua en el Río Pance. Esta variable se alimenta por el flujo del caudal de entrada del agua, el cual está sujeto a una variable externa que son los caudales anuales. Por otro lado, el NRH se disminuye a través del consumo, el cual está ligado a un consumo total que representa la captación del agua del Río y el consumo ambiental que se da a causa de la demanda ambiental del mismo. Es decir, existe un consumo total que se deriva del agua para términos ambientales y con respecto a las captaciones, ya sea de uso humano (acueducto), doméstico o de riego, que aumenta el flujo de salida llamado Consumo de agua, y que por ende disminuye la variable de nivel NRH.
- Crecimiento Poblacional: variable de nivel que representa las proyecciones de población establecidas para la comuna 22.
- Acumulación de Vertimientos: variable de nivel representa los contaminantes que son depositados al Río, que afectan la calidad del agua, y que a su vez posibilita el deterioro del recurso, generando una disminución del caudal. Esta variable acumula los vertimientos (flujo de entrada), que están dados por la Demanda Biológica de Oxígeno, Demanda Química de Oxígeno y los Solidos Suspendidos Totales. El flujo de salida que se considera es la disminución de un porcentaje de los vertimientos debido a el tratamiento de aguas residuales.
- Captaciones de Agua: representa la variable de nivel que acumula el número de captaciones de agua para los usos mencionados anteriormente. Lo anterior resulta de una necesidad de abastecer el crecimiento poblacional debido a que anualmente aumenta el número de captaciones realizadas.
- Índice de Calidad del Agua (ICA): indicador que evalúa las concentraciones de los diferentes tipos de vertimientos con el objetivo de estimar un valor puntual que determina el estado actual de la calidad del agua del río.

### 3.4 Estructura del modelo

El Anexo 1 presenta la estructura del modelo de simulación con respecto a la evaluación de la sostenibilidad de río Pance, desde la perspectiva del metabolismo urbano. El modelo tiene como variables principales: en primer lugar, el nivel del recurso hídrico, que se determina por las entradas que hacen referencia a los niveles del caudal en diferentes mediciones; y por las salidas que son generadas por el consumo total (que comprende el consumo de las captaciones y la demanda ambiental). En segundo lugar, se encuentran las captaciones de agua, donde se incluyen los consumos por uso humano (acueducto), doméstico y de riego. Por último, se presenta el crecimiento poblacional de la comuna 22 y la generación y acumulación de vertimientos que afectan directamente la calidad del agua del río Pance.

El modelo de simulación expuesto evalúa en un horizonte de 20 años el Índice de Calidad de Agua (ICA) del río Pance, teniendo en cuenta las concentraciones de los diferentes vertimientos generados por la población y la disminución del nivel del recurso hídrico que se da por el consumo total del agua proveniente del río. La explicación del modelo se divide en cuatro secciones que serán expuestas a continuación.

### 3.5 Ecuaciones del Modelo

#### 3.5.1 Nivel del recurso hídrico

El *nivel del recurso hídrico (NRH)* se calcula como la integral a través del tiempo de las entradas de agua (EA) y las salidas, que hacen referencia al consumo de agua (CA), más un valor inicial en  $t=0$  (ver Ec. (1)).

$$NRH(t) = \int_{t_1}^{t_n} [EA(t) - CA(t)] + NRH(t_0) \quad (1)$$

### 3.5.2 Entrada de Agua (Oferta Hídrica)

Las *entradas de agua (EA)* están dadas por caudales de entrada anuales que se modelaron con una distribución de probabilidad normal, por medio de la función RANDOM NORMAL de Vensim PLE, donde se utiliza los siguientes parámetros: el valor máximo, el valor mínimo, la media y la desviación estándar de los datos. Para las simulaciones Montecarlo, se parametriza la entrada de agua como una variable estocástica en el software Vensim DSS usando los datos de los caudales anuales.

### 3.5.3 Consumo de Agua (Demanda Hídrica)

La demanda del recurso hídrico se representa en la variable *Consumo Total de Agua (CTA)*, que está compuesta por dos elementos (ver Ec. (2)). En primer lugar, se tiene la *Demanda Ambiental (DA)* (ver Ec. (3)), que hace referencia a la utilización del agua por el propio ecosistema para mantener su vida y funcionamiento natural. Para esto, se hace uso de una *Tasa de Demanda Ambiental (TA)* que permite determinar dicho valor sobre el nivel del recurso hídrico. Debido a que no se encontraron datos para el río Pance, se toma como referencia el documento Balance Oferta- Demanda de Agua Cuenca del Río Lili, donde se estipula que la tasa ambiental para este río equivale al 20% del caudal o nivel del recurso hídrico [17].

$$CTA = DA + CDCP \quad (2)$$

$$DA = NRH * TA \quad (3)$$

Por otro lado, el *Consumo de Captaciones (CDCP)*, depende del número de *Captaciones de Agua (CP)*, el *Caudal Promedio Máximo por Captación (CCP)* y el *Factor de Consumo de Captación (FCCP)*. (ver Ec. (4)).

$$CDCP = CP * CCP * FCCP \quad (4)$$

El *Caudal Promedio Máximo por Captación (CCP)* tiene como referencia la reglamentación realizada por la CVC donde se encuentra el caudal asociado a cada usuario y el número histórico de captaciones registradas, considerando las derivaciones del río que pertenecen al perímetro urbano. Por lo anterior, para determinar la dinámica y número de las *Captaciones de Agua (CP)* (ver Ec. (5)), se determina el *Límite de Captaciones (LCP)* que equivale a 1000 y se representa mediante una integral a través del tiempo de la variable *Aumento de Captaciones (ACP)*, más un valor inicial, que representa el número actual de captaciones de agua.

$$CP(t) = \int_{t_1}^{t_n} ACP(t) + CP(t_0) \quad (5)$$

Por otra parte, para establecer el *Aumento de Captaciones (ACP)* (ver Ec. (6)), se define una *Brecha (BCP)* (ver Ec. (7)), que permite calcular el número de captaciones que aún quedan disponibles a medida que pasa el tiempo. Lo anterior, está basado en la variable del Tiempo de Aumento de Captaciones (TACP), que hace referencia al factor en el que incrementan las captaciones anualmente.

$$ACP = \frac{BCP}{TACP} \quad (6)$$

$$BCP = LCP - CP \quad (7)$$

Los futuros escenarios de consumo son el resultado de la variación del *Factor Consumo de Captaciones (FCCP)* entre el 50% y 120% que afecta directamente la variable Consumo de Captaciones (CDCP).

### 3.5.4 Crecimiento Urbano

La dinámica de la *Población del Río Pance (PRP)*- Comuna 22 (ver. Ec (8)), está representada por la integral a través del tiempo del *Crecimiento Neto de Habitantes (CNH)*, más el valor actual de la población de la comuna 22 para el año 2019, que es igual a 12045 habitantes, según un informe estadístico del Departamento Administrativo de Planeación Municipal [18].

$$PRP(t) = \int_{t_1}^{t_n} CHN(t) + PRP(t_0) \quad (8)$$

### 3.5.5 Vertimientos

El modelo comprende los principales vertimientos que genera una población y que pueden contribuir al deterioro de las aguas de un afluente. Es por esta razón que expone las siguientes variables: *Acumulación DBO5* (ver Ec. (9)), *Acumulación*

SST (ver Ec. (10)) y *Acumulación DQO* (ver Ec. (11)). Puesto que son variables de nivel, es decir, que presentan una acumulación, su parametrización está dada por la integral de una entrada y una salida, más un valor inicial.

$$ACUM.DBO5(t) = \int_{t_1}^{tn} DBO5 Total(t) - DDBO5(t) + ACUM.DBO5(t_0) \quad (9)$$

$$ACUM.SST(t) = \int_{t_1}^{tn} SST Total(t) - DSST(t) + ACUM.SST(t_0) \quad (10)$$

$$ACUM.DQO(t) = \int_{t_1}^{tn} DQO Total(t) - DDQO(t) + ACUM.DQO(t_0) \quad (11)$$

Las tres variables son formuladas de igual manera, donde se tiene una entrada que representa el vertimiento total, a causa de la PRP y el vertimiento per cápita (ver Ec. (12,13 y 14)), y una salida que representa la Disminución del vertimiento (DDBO5, DSST, DDQO) (ver Ec. (15,16 y 17)), debido a una tasa (TSD) equivalente al 31%, 18% y 15% respectivamente, lo anterior como causa de tratamientos de aguas residuales. Estos datos fueron extraídos del Estudio Nacional del Agua realizado por el Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales [19].

$$DBO5 Total = PRP * DBO5 Per Cápita \quad (12)$$

$$SST Total = PRP * SST Per Cápita \quad (13)$$

$$DQO Total = PRP * DQO Per Cápita \quad (14)$$

$$DDBO5 = TSD DBO5 * ACUM.DBO5 \quad (15)$$

$$DSST = TSD SST * ACUM.SST \quad (16)$$

$$DDQO = TSD DQO * ACUM.DQO \quad (17)$$

### 3.5.6 Indicadores

El modelo presenta dos indicadores, que permiten identificar el comportamiento del río en un horizonte de 20 años, con respecto a la parametrización de las variables expuestas anteriormente.

#### 3.5.6.1 Índice de Calidad de Agua

El indicador principal y motivación del objeto de estudio, es el Índice de Calidad de Agua (ICA) que “determina condiciones fisicoquímicas generales de la calidad de un cuerpo de agua, y permite reconocer problemas de contaminación en un punto determinado, para un intervalo de tiempo específico”[19].

Para calcular dicho indicador se utilizan los principales tipos de vertimientos o contaminantes seleccionados en el modelo: Demanda Biológica de Oxígeno (DBO5), Solidos Suspendidos Totales (SST) y Demanda Química de Oxígeno (DQO). Para poder sumar y normalizar las magnitudes de estos tres diferentes tipos de contaminantes, se transforman dichos valores en unas ecuaciones que determinan los subíndices de cada variable. Una vez obtenidos los subíndices, se tiene un factor de ponderación de 0,33. El cálculo del Índice de Calidad de Agua (ICA) (ver Ec. (18)), se basa en el Informe de Caracterización de Aguas Índice de Calidad de los Ríos Aguacatal, Cali, Cañavalejo, Lili, Meléndez y Pance, realizado por el DAGMA, donde se expone que este indicador es una suma lineal ponderada de los subíndices, que se expresa de la siguiente manera [20]:

$$ICA = \sum_{i=1}^n W_i I_i \quad (18)$$

Donde:

i: Cada uno de los tres parámetros que se requiere para el cálculo del ICA.

I: Subíndices correspondientes a cada variable.

W: Peso asignado a cada variable.

El valor del indicador de la calidad del agua varía entre 0 y 1 y es clasificado según los siguientes parámetros propuestos por el IDEAM:

**Tabla 1. Clasificación para presentar el aplicativo del ICA.**

Calidad del Agua	Rango Numérico	Color
Muy malo	0 - 0.25	Rojo
Malo	0.26 - 0.50	Naranja
Regular	0.51 - 0.70	Amarillo
Aceptable	0.71 - 0.90	Verde
Bueno	0.91 - 1.00	Azul

Fuente: [19]

Por otra parte, para calcular los subíndices de los contaminantes, primero fue necesario hallar la concentración de cada uno de ellos sobre el nivel del recurso hídrico. Para esto se utilizaron las siguientes ecuaciones:

$$\text{Concentración DBO5} = \frac{ACUM.DBO5}{NHR} \quad (19)$$

$$\text{Concentración SST} = \frac{ACUM.SST}{NHR} \quad (20)$$

$$\text{Concentración DQO} = \frac{ACUM.DQO}{NHR} \quad (21)$$

Para poder hacer uso de la teoría con respecto a las ecuaciones de los subíndices, fue necesario utilizar un *factor de conversión de concentración (FCC)* (ver Ec. (22)) que permitiera transformar los datos de concentración de (Kg/m<sup>3</sup>) a (mg/L).

$$FCC = \frac{m^3}{1000L} * \frac{1000g}{1Kg} * \frac{1000mg}{1g} = 1000 \text{ mg/L} \quad (22)$$

A continuación, se presentan las ecuaciones para el cálculo de los subíndices de calidad de la Demanda Biológica de Oxígeno (DBO5), los Sólidos Suspendidos Totales (SST) y la Demanda Química de Oxígeno (ver Ec. (23, 24 y 25) respectivamente):

$$\begin{aligned} & \text{Si } DBO5_{(mg/L)} \leq 2, \text{ entonces } I_{DBO5} = 1 \\ & \text{Si } 2 < DBO5_{(mg/L)} < 30, \text{ entonces } I_{DBO5} = 1 - (-0.05 + 0.70 \text{Log}_{10}(DBO5)) \\ & \text{Si } DBO5_{(mg/L)} \geq 30, \text{ entonces } I_{DBO5} = 0 \end{aligned} \quad (23)$$

$$\begin{aligned} & \text{Si } SST_{(mg/L)} \leq 4.5, \text{ entonces } I_{SST} = 1 \\ & \text{Si } SST_{(mg/L)} \geq 320, \text{ entonces } I_{SST} = 0 \\ & \text{Si } 4.5 < SST_{(mg/L)} < 320, \text{ entonces } I_{SST} = 1 - (-0.02 + 0.003 * SST_{(mg/L)}) \end{aligned} \quad (24)$$

$$\begin{aligned} & \text{Si } DQO_{(mg/L)} \leq 20, \text{ entonces } I_{DQO} = 0.91 \\ & \text{Si } 20 < DQO_{(mg/L)} \leq 25, \text{ entonces } I_{DQO} = 0.71 \\ & \text{Si } 25 < DQO_{(mg/L)} \leq 40, \text{ entonces } I_{DQO} = 0.51 \\ & \text{Si } 40 < DQO_{(mg/L)} \leq 80, \text{ entonces } I_{DQO} = 0.26 \\ & \text{Si } DQO_{(mg/L)} > 80, \text{ entonces } I_{DQO} = 0.125 \end{aligned} \quad (25)$$

### 3.5.6.2 Porcentaje de Consumo de Captaciones

Este indicador tiene como objetivo determinar la fracción o porcentaje que representa el consumo de captaciones con respecto al consumo total. Esta dado por:

$$\% \text{Consumo Captaciones} = \frac{CDCP}{CTA} \quad (26)$$

### 3.6 Política de Control

Con el fin de regular la variable Captaciones de Agua (CP), que representa el número de usuarios que están haciendo uso el recurso hídrico del Río Pance, se busca, disminuir el consumo del recurso por parte de dichas captaciones y asimismo el consumo total, con el propósito de contribuir a la regulación del NHR que es una variable clave para determinar la calidad del agua del Río. Según lo mencionado, se desarrolla una política de control (Ver Figura 7), que se encarga de normalizar las captaciones que están realizando los diferentes usuarios a través de concesionar anualmente un porcentaje total de dichas captaciones, regulando el tiempo de aumento y de tal manera prohibiendo a los no concesionados realizar consumo del recurso.

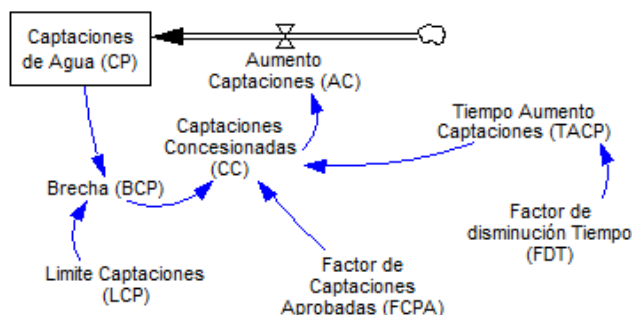


Figura 7. Sección del modelo con política de control.

Fuente: Autores

Para la política de control se establecieron dos factores, en primer lugar, se consideró un factor de captaciones aprobadas (FCPA), que representa el porcentaje de captaciones que van a ser concesionadas legalmente ante la entidad controladora que actualmente es el DAGMA, en segundo lugar, se establece un factor de disminución de tiempo de aumento de captaciones (FDT). Dichos factores modifican de tal manera la ecuación del TACP (ver Ec. (27)) y crea una nueva variable llamada Captaciones concesionadas (CC) (ver Ec. (28)). A continuación, se explican las ecuaciones empleadas:

$$TACP = 10 * FDT \quad (27)$$

$$CC = (BCP/TACP) * FCPA \quad (28)$$

Donde FCPA es igual a 0.4 y FDT es igual a 5, parámetros calibrados con base en diferentes simulaciones realizadas hasta lograr el ajuste deseado y considerando que el crecimiento anual de las concesiones es aproximadamente de 4 concesiones.

### 3.7 Datos de Entrada

Los datos de los caudales de entrada de agua se extrajeron del proyecto de grado “Sostenibilidad del Río Pance como recurso hídrico: una aproximación desde la dinámica de sistemas”[10], que a su vez fueron tomados del Reporte Caudales Promedio Diarios, Estación Pance Chorrera del Indio realizado en el año 2016 por la CVC. Debido a que el modelo se simula en un horizonte de años, con base en estos datos se encontró el valor mínimo, el máximo, la media y desviación estándar promedio anual, para alimentar la variable *Caudales de Entrada* del modelo. Asimismo, debido a que estos datos se encontraban en unidades (m<sup>3</sup>/s) fue necesaria su conversión a m<sup>3</sup>/año.

Tabla 2. Parámetros para la distribución normal de los caudales de entrada en (m3/año).

Mes	Caudales de diferentes meses (m3/s)			
	Min	Max	Media	Dsvest
Enero	0,570	16,380	2,606	2,306
Febrero	0,500	9,670	3,023	1,864
Marzo	0,800	13,020	3,646	2,599
Abril	0,900	11,190	4,165	1,870
Mayo	0,760	12,550	3,590	2,066
Junio	0,540	12,790	2,114	1,823
Julio	0,370	12,790	2,467	2,439
Agosto	0,320	6,960	1,622	1,082
Septiembre	0,320	5,780	1,760	0,949
Octubre	0,580	9,870	3,732	2,441
Noviembre	1,260	18,620	6,054	4,074
Diciembre	1,190	11,630	4,005	2,093
<b>Promedio (Anual)</b>	0,676	11,77083333	3,232	2,1338333
<b>Anual (m3/año)</b>	<b>21313080</b>	<b>371205000</b>	<b>101924352</b>	<b>67292568</b>

Fuente: Autores



$$\text{Factor de Conversión (FC)} = \frac{60 \text{ s}}{1 \text{ min}} * \frac{60 \text{ min}}{1 \text{ hr}} * \frac{24 \text{ hr}}{1 \text{ día}} * \frac{365 \text{ días}}{1 \text{ año}} = \frac{31536000}{\text{año}} \quad (29)$$

De igual forma, el valor inicial de  $NRH(t_0)$  se obtuvo de la Tabla 2, tomando el valor máximo de las medias y realizando la respectiva conversión. Este valor equivale a 190918944 m<sup>3</sup>/año.

$$NRH(t_0) = MAX(medias) * FC \quad (30)$$

La Tasa de Demanda Ambiental (TA) fue tomada del documento Balance Oferta- Demanda de Agua Cuenca del Río Lili, donde se estipula que la tasa ambiental para este río equivale al 20% del caudal o nivel del recurso hídrico [17]. Se tomó como referencia dicho valor, puesto que, no se obtuvo esta información para el Río Pance.

Con respecto a los datos de entrada del comportamiento de la Población del Río Pance (PRP), se utilizaron las proyecciones de población en número de habitantes para la comuna 22, realizada por el Departamento Administrativo de Planeación Municipal, con respecto al escenario de crecimiento según las tendencias del DANE [18], (ver Gráfico 1). De estos datos se obtuvo la ecuación de la línea de tendencia donde se utilizaron la pendiente y el intercepto para parametrizar las variables de Crecimiento Neto de Habitantes (CNH) y el valor inicial de  $PRP(t_0)$  (ver Ec. (31)).

$$\begin{aligned} \text{Ecuación de una recta } & y = mx + b \\ \text{Ecuación de la recta (PRP)} & = 291.85x + 12045 \end{aligned} \quad (31)$$

De lo anterior, se obtiene que el valor para la variable CNH es igual a 291.85 habitantes y que la variable  $PRP(t_0)$  equivale a 12045, donde  $t_0$ = Año 2019.

Por otra parte, los valores per cápita de los tipos de vertimientos o contaminantes fueron seleccionados de un informe realizado por la Universidad de los Andes, donde se determinan dichos aportes domésticos para diferentes cuencas sanitarias de la ciudad de Bogotá [21]. Se seleccionó el aporte máximo y se realizó la conversión a las unidades necesarias. Los datos se exponen en la siguiente tabla:

**Tabla 3. Aportes Per Cápita de los Diferentes Vertimientos**

Tipo Vertimiento	Carga Contaminante (g/hab-día)	kg/hab-día	kg/hab-año
DBO5	77,49	0,07749	<b>28,2839</b>
DQO	194,59	0,19459	<b>71,0254</b>
SST	171,91	0,17191	<b>62,7472</b>

Fuente: Autores

Por último, los valores iniciales de variable *Acumulación* de cada vertimiento fueron extraídos del Informe de Caracterización de Aguas Índice de Calidad de los Ríos Aguacatal, Cali, Cañaveralejo, Lili, Meléndez y Pance, [20], donde se obtiene que  $ACUM.DBO5(t_0) = 5.8 \text{ (mg/L)}$ ,  $ACUM.SST(t_0) = 8.5 \text{ (mg/L)}$ ,  $ACUM.DQO(t_0) = 12 \text{ (mg/L)}$ . Dichos datos representan el valor de la concentración en (mg/L) de los contaminantes DBO5, SST Y DQO para el último mes del año 2017 del Río Pance en la salida al perímetro urbano. Para consistencia en unidades, se realizó la respectiva conversión teniendo en cuenta el Factor de Conversión de Vertimientos ( $FCV$ ) y el  $NRH(t_0) = 190918944 \text{ m}^3/\text{año}$ , puesto que se requería el valor de cada vertimiento en Kilogramos. (ver Ec. (33, 34, 35))

$$FCV = \frac{1000 \text{ L}}{1 \text{ m}^3} * \frac{190918944 \text{ m}^3}{\text{año}} * \frac{1 \text{ g}}{1000 \text{ mg}} * \frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ g}} = \frac{190918.944 \text{ Kg}}{\text{año}} \quad (32)$$

Por lo que se obtiene que:

$$ACUM.DBO5(t_0) = 5.8 \text{ (mg/L)} * FCV = 1107329.875 \text{ KgDBO5/Año} \quad (33)$$

$$ACUM.SST(t_0) = 8.5 \text{ (mg/L)} * FCV = 1622811.02 \text{ KgSST/Año} \quad (34)$$

$$ACUM.DQO(t_0) = 12 \text{ (mg/L)} * FCV = 2291027.328 \text{ KgDQO/Año} \quad (35)$$

### 3.8 Escenarios de Simulación

Con el fin de llevar a cabo la evaluación de la sostenibilidad del Río Pance, se realizaron cuatro escenarios, en donde se muestran cuatro conductas diferentes relacionadas con el consumo de las captaciones por parte de los usuarios tanto ilegales como concesionados. A partir de estos cuatro escenarios, se hizo el análisis de la variabilidad del comportamiento del ICA y el NHR, lo que permitió evaluar el estado del Río Pance bajo perspectivas diferentes. Estos escenarios se estiman bajo una percepción del consumo de los usuarios, relacionado con el *Caudal Máximo Promedio por Captación*, es decir los

escenarios se diferencian por el porcentaje de consumo con base en ese caudal promedio, y se incluyen escenarios por encima y por debajo del promedio.

El primer escenario es considerado como el escenario base, que refleja un consumo del 100% del *Caudal Máximo Promedio por Captación*, en donde el FCCP toma un valor de 1. El escenario 1.1, muestra el consumo del 50%, es decir, se supone que los usuarios van a consumir el 50% del *Caudal Máximo Promedio por Captación*; en este caso el FCCP toma un valor de 0.5. Para el caso del escenario 1.2, se asume que los usuarios solo van a consumir el 80% de ese caudal máximo, por lo cual FCCP es igual a 0.8. Ahora bien, para el siguiente escenario se supone un exceso de consumo, debido a que aún no se ejerce el suficiente control sobre esta variable, de tal manera que en la realidad se puede estar dando que los usuarios capten más de lo debido. Con lo anterior, se determina en el escenario 1.3 un consumo del 120% del *Caudal Máximo Promedio por Captación*, en donde se supone que los usuarios están consumiendo un 20% más de lo permitido, por ende, el FCCP toma un valor 1.2.

## 4 RESULTADOS DE SIMULACIÓN

A continuación, en esta sección se presenta los resultados de una de las múltiples corridas obtenidas a partir de la simulación del modelo en Vensim PLE.

### 4.1 Resultados y Discusión del Modelo de Simulación

En primer lugar, considerando el Anexo 2 donde se muestran los resultados del ICA para cada uno de los escenarios mencionados anteriormente durante un periodo de 20 años, se observa como este índice varía según el porcentaje de consumo del *Caudal Máximo Promedio por Captación*. De este modo, el escenario 1.1, que representa el menor consumo del caudal máximo permitido (50%), refleja los mejores resultados del ICA, tomando valores entre 0.77 como mínimo y 0.97 como máximo, recibiendo así, una calificación aceptable y buena de la calidad del agua.

Ahora bien, en la Tabla 4, donde se muestra la clasificación de la calidad del agua de los diferentes escenarios, considerando el valor del ICA que se obtuvo en el último periodo (año 20), se aprecia como para el escenario 1 (consumo del 100%), el Río Pance tiene una calidad del agua mala, para el escenario 1.1 (consumo 50%), la calidad es aceptable, para el escenario 1.2 (consumo del 80%), la condición del agua es regular y para el ultimo escenario, que representa el mayor consumo (20% más de lo permitido), se refleja una calidad del agua mala.

Tabla 4. Clasificación del ICA del periodo 20 de los diferentes escenarios.

	Valor ICA	Clasificación del ICA
<b>Escenario Base 1</b>	0,50	Mala
<b>Escenario 1.1</b>	0,81	Aceptable
<b>Escenario 1.2</b>	0,65	Regular
<b>Escenario 1.3</b>	0,35	Mala

Fuente: Autores

Asimismo, se desarrolla el Gráfico 2, que permite observar el comportamiento del ICA para los diferentes escenarios planteados. A partir de esta gráfica se puede evidenciar como el consumo total de las captaciones está relacionado directamente con la calidad del agua del Río Pance. Como se mencionó anteriormente cuando el consumo del recurso es menor el comportamiento del ICA en el tiempo tiende a ser aceptable, como se refleja en el escenario 1.1, pero a medida que ese consumo crece, el ICA tiende a presentar una conducta mala, como se observa en el escenario 1.3.

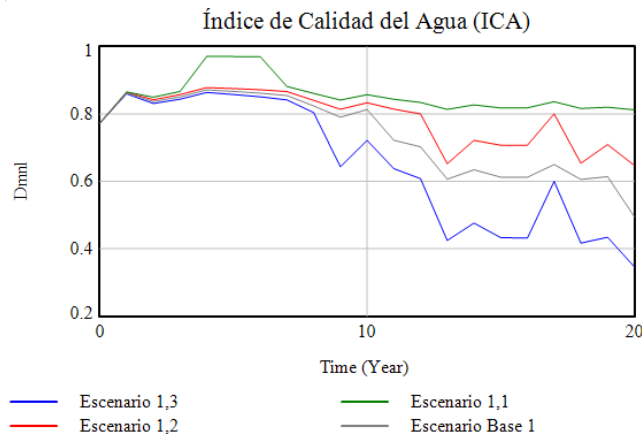
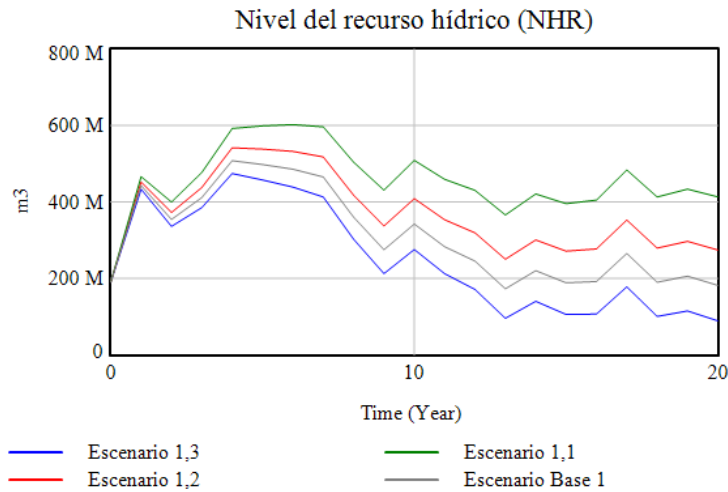


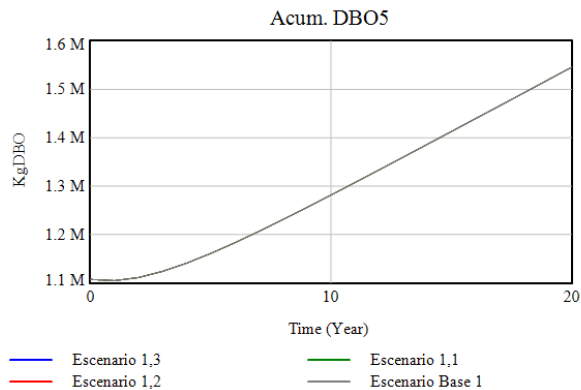
Gráfico 2. Comportamiento del ICA de los escenarios simulados. Fuente: Autores.

Lo anterior sucede dado que, a un mayor consumo, el nivel del recurso hídrico disminuye, y la concentración de los diferentes vertimientos aumenta, puesto que crecen anualmente debido al incremento poblacional. En el Gráfico 3, se puede observar como el NHR disminuye a medida que crece el consumo de las captaciones de agua, por ejemplo, en el caso del escenario 1.1, el NHR no disminuye tan drásticamente, como si sucede en el escenario 1.3.

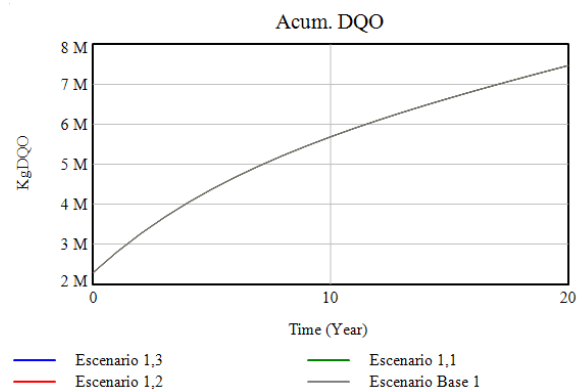


**Gráfico 3. Comportamiento del Nivel del Recurso Hídrico en los diferentes escenarios.**  
Fuente: Autores.

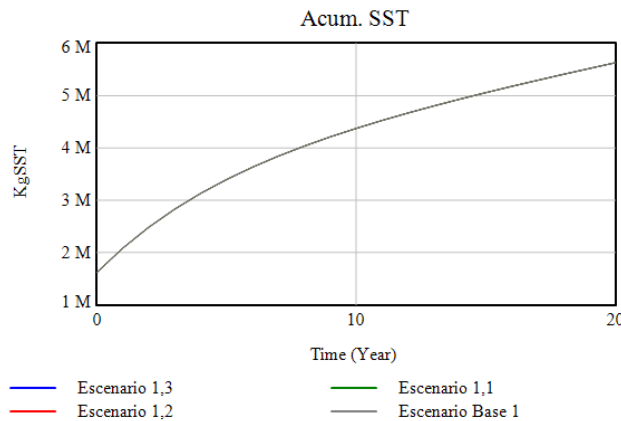
Ahora, en los Gráficos 4,5 y 6 se puede observar como la acumulación de los diferentes vertimientos no varía en cada escenario, pero aumenta anualmente. Esto se da, debido a que el incremento de los vertimientos está relacionado directamente con el crecimiento poblacional, el cual crece de forma lineal anualmente (Ver Gráfico 7).



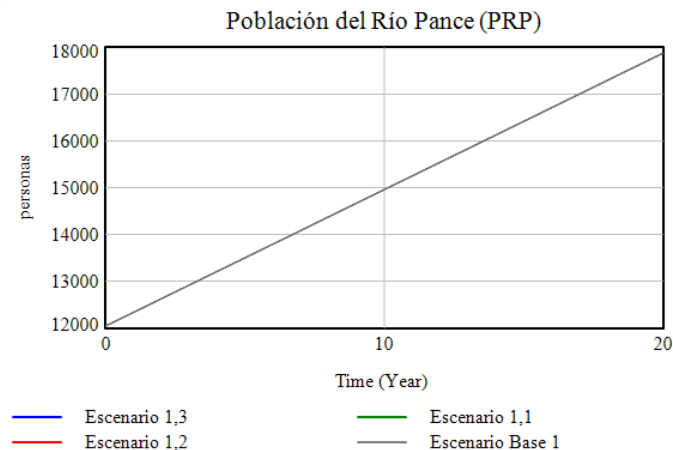
**Gráfico 4. Acumulación de DBO.** Fuente: Autores.



**Gráfico 5. Acumulación de DQO.** Fuente: Autores.



**Gráfico 6. Acumulación SST.** Fuente: Autores.



**Gráfico 7. Crecimiento Poblacional Comuna 22. Fuente: Autores.**

Ahora bien, dado que los vertimientos crecen año a año independientemente de los escenarios y que el NHR si varía según los diferentes panoramas evaluados, en el caso donde se plantea un mayor consumo del recurso, se puede observar como el ICA empeora, puesto que al NHR disminuir y la acumulación de los vertimientos aumentar, la concentración de estos será mayor. El comportamiento de la situación anterior se observa en el Gráfico 2, reflejando así, una relación entre el consumo y el ICA.

Por último, con base en la pregunta de la problemática, ¿Cuál es el riesgo de que el Río Pance se convierta en un vertedero y no sea sostenible en un horizonte de 20 años, para lograr abastecer su demanda ambiental y consumo poblacional, replicando así la historia de los demás ríos de la ciudad?, es importante establecer una comparación entre el comportamiento del ICA del escenario base (escenario 1) y el ICA actual del Río Cañaveralejo de Cali, el cual es considerado el río con mayor deterioro ambiental debido al crecimiento poblacional y los diferentes vertimientos que se han depositado en él.

Actualmente, según el Informe de caracterización de aguas e Índice de Calidad de Agua de los Ríos Aguacatal , Cali , Cañaveralejo , Lili , Meléndez Y Pance del DAGMA [22], el ICA actual del Río Cañaveralejo es de 0.28, representando una condición mala del Río. Para el caso del Río Pance, dentro de la simulación del modelo para el Escenario Base, se tiene que para 20 años el ICA según los parámetros evaluados será aproximadamente de 0.50, reflejando una condición mala para el recurso del río. Debido a lo anterior, es posible argumentar, que, si no se establecen políticas de control y regulación en cuanto al consumo y al crecimiento poblacional, la condición del Río Pance, en unos años, tenderá a ser igual a la del Río Cañaveralejo.

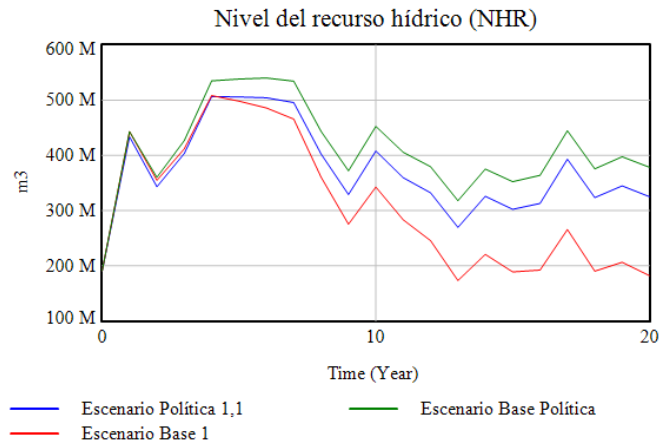
#### **4.2 Resultados de la Política de control**

Para determinar los resultados de la Política de Control, se realiza una comparación frente al modelo base de simulación (FCCP=1), considerado Escenario Base 1, el cual representa el comportamiento usual del sistema y el escenario donde se considera la Política de Control, determinado Escenario Base Política, evaluando así las variables principales con y sin la política. Asimismo, se establece un Escenario Política 1.1 que integra tanto los parámetros de la política de control considerados en el Escenario Base Política y el Escenario 1.3, es decir que se aplica un Factor Consumo de Captaciones (FCPP) de 1.2. Es decir, se considera un consumo equivalente al 120% del Caudal Máximo Promedio por Captación.

En primer lugar, se obtiene el Gráfico 8, que refleja el comportamiento del NHR en los tres escenarios. Con base en los resultados, se puede observar la diferencia existente entre los escenarios evaluados. Lo anterior permite determinar que si el consumo del agua continua con la tendencia actual sin ningún tipo de control, el NHR va disminuir drásticamente, por lo que en los próximos 20 años la disponibilidad del recurso no podrá abastecer a la población.

Por otro lado, cuando se implementa una política referente a una limitación en el número de captaciones que podrán hacer uso del recurso, se observa un comportamiento más estable en el NHR. Aun así, en el Escenario Política 1.1, el NHR presenta un comportamiento más estacionario en comparación al Escenario Base 1 que no considera una política. Por lo

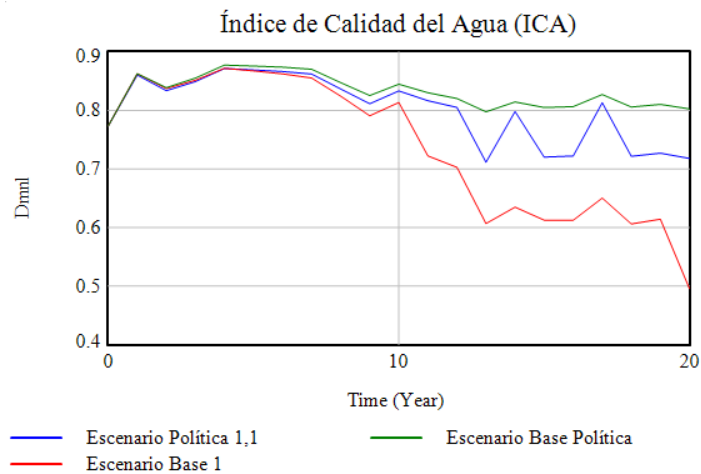
anterior, se puede concluir que para lograr una mayor estabilidad en el NHR es importante establecer límites en el número de usuarios que realizan captación del recurso del río.



**Gráfico 8. Comportamiento del NHR en el Escenario Base 1, Escenario Base Política y Escenario Política 1.1.**  
Fuente: Autores.

Por otro lado, es importante evaluar el comportamiento del ICA en los escenarios establecidos. Como se mencionó anteriormente, el ICA está relacionado directamente con el comportamiento del NHR, el cual depende del consumo por parte de las captaciones. Entonces, si se regula el NHR, regulando el consumo, se disminuyen las concentraciones de los vertimientos y por ende mejora el ICA.

De igual forma, en el Gráfico 9, se puede observar el comportamiento del ICA en los tres escenarios considerados. Con base en el comportamiento reflejado, es posible establecer, que si se continúa con el comportamiento actual, ignorando cualquier tipo de regulación, la calidad del agua siempre va a tender a presentar condiciones malas, por lo cual en un futuro el agua del Río no será apta para su consumo. Por otra parte, si se emplea una política que regule el número de usuarios que están captando agua del río, el ICA tenderá a presentar condiciones aceptables, aun así, el consumo sea mayor al establecido como se consideró en el Escenario Política 1.1.



**Gráfico 9. Comportamiento del ICA en el Escenario Base 1, Escenario Base Política y Escenario Política 1.1.**  
Fuente: Autores.

Considerando el valor del ICA para el periodo 20 en cada uno de los escenarios evaluados, las condiciones en cuanto a la calidad del agua en el Río Pance para el Escenario Base 1, tenderá a ser mala, para el Escenario Base Política tenderán a ser aceptable al igual que para el Escenario Política 1.1. Lo anterior, se puede observar en la Tabla 5.

Tabla 5. Clasificación del ICA para los Escenarios Base 1 y 2.

	Valor ICA	Clasificación del ICA
<b>Escenario Base 1</b>	0.5	Mala
<b>Escenario Base Política</b>	0.80	Aceptable
<b>Escenario Política 1.1</b>	0.72	Aceptable

Fuente: Autores.

Por último, el Gráfico 10, representa el comportamiento en cuanto al porcentaje de consumo del recurso por parte de las captaciones. En dicha ilustración, se puede observar como en el Escenario Base 1, dicho consumo tiende a crecer a medida que pasa el tiempo, por lo que el NHR tiende a disminuir como ya se explicó anteriormente. Por el contrario, en los Escenario Base Política y Escenario Política 1., donde se emplea una política de control en cuanto al número de captaciones a las que se les permitirá el consumo; se puede observar como el comportamiento en este caso tiende a ser más estable, por lo cual el NHR también.

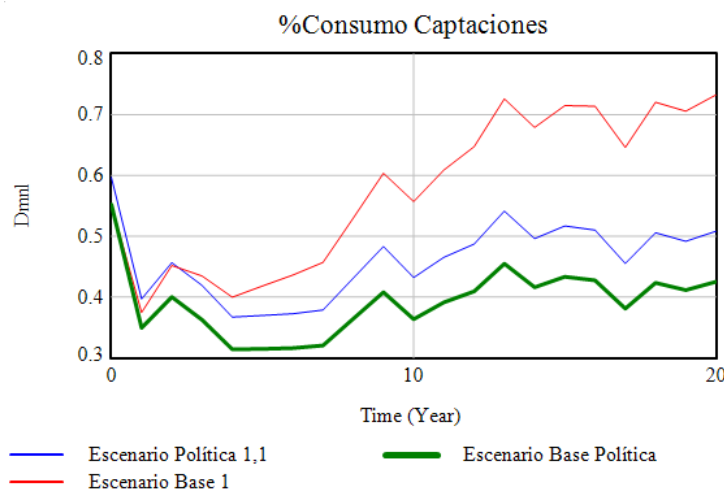


Gráfico 10. Comportamiento del Consumo en el Escenario Base 1, Escenario Base Política y Escenario Política 1.1. Fuente: Autores.

#### 4.3 Resultados de la simulación Montecarlo

Como se ha explicado anteriormente, cuando el índice de calidad del agua de un río toma valores inferiores o iguales a 0.5, se encuentra en una categoría mala, es decir, las condiciones generales de la calidad del agua se traducen en contaminación, deterioro y pérdida de su funcionalidad. Con el objetivo de encontrar la probabilidad de que, en un período de 20 años, el río Pance no sea sostenible para abastecer la demanda poblacional y ambiental, se realizaron simulaciones de Montecarlo por medio del software Vensim DSS, teniendo en cuenta los diferentes escenarios de simulación planteados tanto para la dinámica habitual como para las consideraciones con la política de control. En la tabla 6 se resumen los escenarios propuestos, que varían según el valor que toma el *Factor de Consumo de Captaciones (FCCP)*, que representa el porcentaje del caudal del río consumido por captación.

Tabla 6. Análisis de sensibilidad para el comportamiento del ICA en los diferentes escenarios.

Escenario Base 1 (FCCP= 1)									Escenario 1.1 (FCCP= 0.5)								
Percentil	10%	20%	30%	50%	70%	80%	90%	95%	Percentil	10%	20%	30%	50%	70%	80%	90%	95%
ICA	0,276	0,330	0,420	0,590	0,691	0,773	0,780	0,781	ICA	0,655	0,712	0,720	0,792	0,805	0,809	0,812	0,812

Escenario 1.2 (FCCP= 0.8)									Escenario 1.3 (FCCP= 1.2)								
Percentil	10%	20%	30%	50%	70%	80%	90%	95%	Percentil	10%	20%	30%	50%	70%	80%	90%	95%
ICA	0,472	0,489	0,606	0,639	0,773	0,785	0,791	0,791	ICA	0,215	0,309	0,435	0,521	0,623	0,773	0,787	0,792

Fuente: Autores.

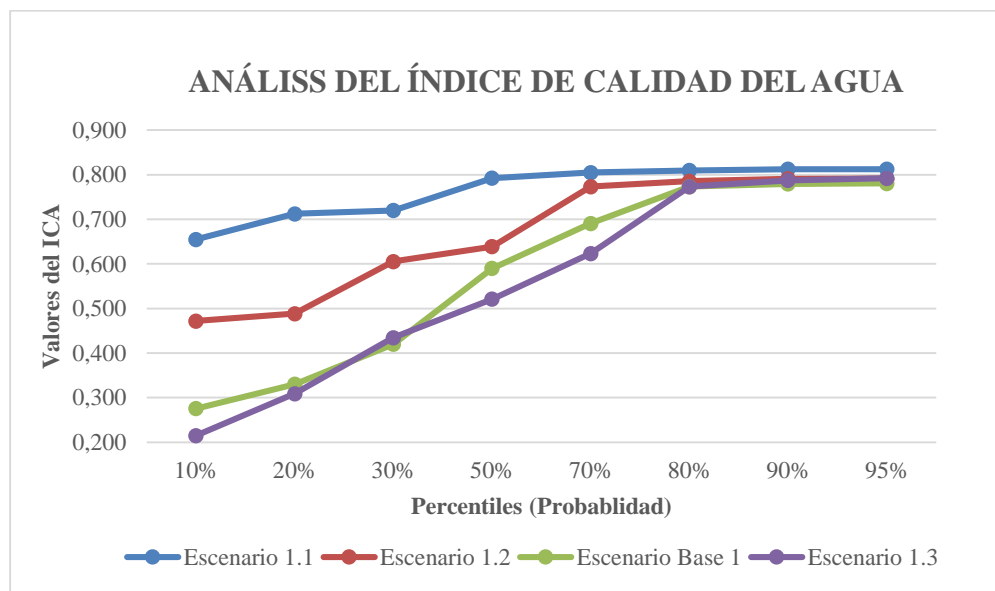
Los resultados obtenidos en la Tabla 6 permiten conocer para cada uno de los diferentes escenarios, la probabilidad acumulada de que el indicador ICA sea cierto valor en el año 20. Debido al objetivo del estudio, se busca en particular las probabilidades asociadas a la categoría muy mala, mala o regular del índice de calidad del agua del río Pance, es decir que el ICA tome valores menores o iguales a 0.25, a 0.5 y a 0.7 respectivamente, según la clasificación del IDEAM. Para

encontrar dichas probabilidades fue necesario realizar interpolaciones lineales entre el conjunto de datos donde se localizan los valores asociados a las categorías.

Según los resultados, se tiene que para el Escenario Base 1, que refleja la dinámica actual del río Pance, existe una probabilidad del 39% de que el valor del ICA sea de 0.5 o menos dentro de 20 años. De igual forma, existe una probabilidad del 9% de que el índice de calidad del agua tome valores menores o iguales a 0.25, clasificando en la categoría de calidad muy mala. Asimismo, para el escenario con factor de consumo de agua moderado (Escenario 1.2) y el escenario pesimista que representa un consumo alto (Escenario 1.3), la probabilidad de clasificar en la categoría mala, que incluye valores menores o iguales a 0.5, es de 21% y 45% respectivamente. Asimismo, para estos escenarios la probabilidad de que la calidad del agua del río Pance en el año 20 se encuentre en la categoría regular es de 59% y 75%, Cabe resaltar que para el escenario moderado en consumo de agua (Escenario 1,2) las probabilidades de clasificar en las categorías muy mala y mala son mínimas, debido a la reducción del consumo de agua en comparación a la dinámica actual, lo contrario ocurre en el Escenario 1.3 donde se evidencia una probabilidad del 14% para la categoría muy mala.

Por otro lado, al analizar los resultados del escenario optimista (Escenario 1.1) se evidencia una mejora en la calidad del agua, puesto que, en el horizonte de 20 años, existe tan solo una probabilidad del 8% de que el valor de ICA clasifique en la categoría mala. Sin embargo, se obtiene una probabilidad del 18% para la categoría regular (tercera categoría en la clasificación). Es importante mencionar, que este escenario presenta los mejores resultados en términos del indicador, debido a la reducción del consumo de agua planteada.

Con el fin de comprender el comportamiento de las probabilidades asociadas a cada categoría del Índice de Calidad del Agua, se construye el gráfico 11, donde se evidencia como la variación del *Factor de Consumo por Captación (FCCP)* tiene gran incidencia en cada uno de los escenarios. Por ejemplo, al observar el comportamiento del Escenario Base 1, y del Escenario 1.3 se encuentra que estos presentan mayor posibilidad de que en el año 20 la calidad del agua del río Pance, se encuentre en malas condiciones, es decir, que a medida que aumente el consumo por parte de los usuarios que captan agua del río, existirá mayor probabilidad de que la calidad del agua del río tienda a deteriorarse. En contraste, se encuentra el Escenario 1.1, que representa el menor consumo de agua, donde a diferencia de los otros escenarios desde el percentil 10 existe la posibilidad de que la calidad del agua se encuentra en la categoría regular.



**Gráfico 11. Análisis del Índice de Calidad del Agua (ICA) para los cuatro escenarios de consumo planteados. Fuente: Autores.**

Por otro parte, se realiza el análisis de sensibilidad para el comportamiento del ICA considerando los parámetros de la política de control; y estableciendo un Escenario PC1 donde se considera el control ejercido sobre las captaciones, pero se asume un factor de exceso de consumo del 20% del Caudal Máximo Promedio por Captación. Los resultados obtenidos se describen en la Tabla 7.

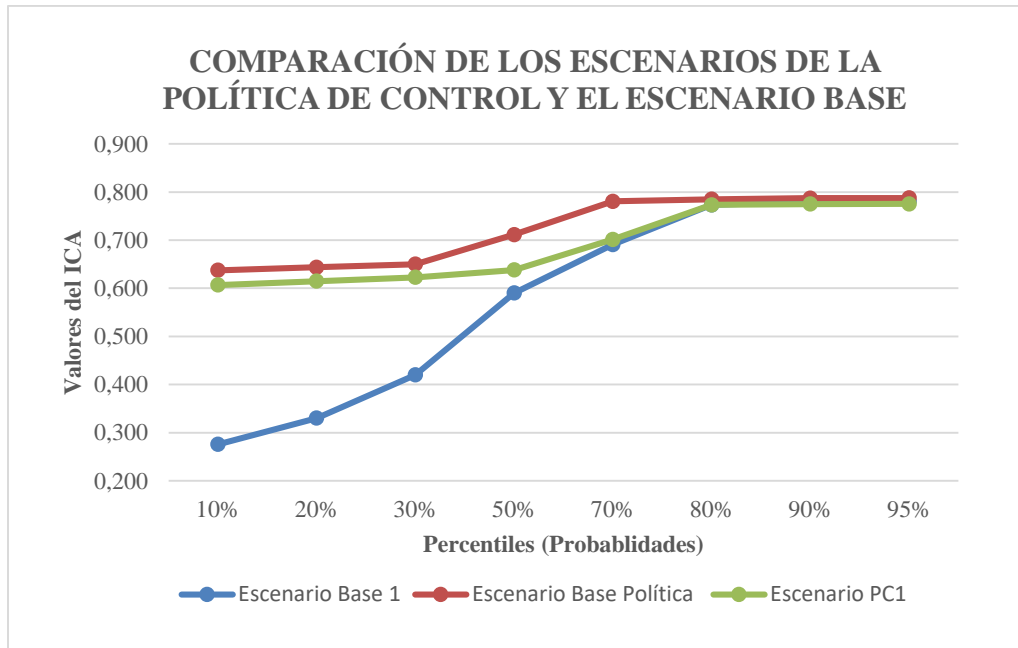
**Tabla 7. Análisis de sensibilidad para el comportamiento del ICA en los diferentes escenarios con política de control.**

Escenario Base Política									Escenario PC1								
Percentil	10%	20%	30%	50%	70%	80%	90%	95%	Percentil	10%	20%	30%	50%	70%	80%	90%	95%
ICA	0,637	0,644	0,650	0,711	0,781	0,785	0,787	0,788	ICA	0,607	0,615	0,623	0,638	0,702	0,773	0,775	0,775

Fuente: Autores.

Para el caso de los escenarios que incluyen una política que limita la cantidad de usuarios que captan recurso del río, se encontró que la probabilidad de que el río tienda a tener una calidad mala es mínima, al ser del 8% para ambos escenarios. Por el contrario, al analizar el comportamiento de los escenarios de la política de control, se observa que tienden a tener una calidad desde la categoría regular con una probabilidad del 46% y 70% respectivamente. Con lo anterior, se observa a que pesar de que en el Escenario PC1 se considere un *Factor de Consumo por Captación (FCCP=1.2)*, se logra regular las condiciones del estado general de la calidad del agua del río Pance, al establecer límites en cuanto a los usuarios que captan agua del río y a la cantidad asociada a ese consumo.

Al realizar el contraste con el Escenario Base 1 y los Escenarios de la política de control, se evidencia una mejora significativa en la calidad del agua del río Pance para el año 20. Como se observa en la gráfica 12, el Escenario Base representa desde el percentil 10, la posibilidad de que, en esas condiciones, el agua del río se encuentre deteriorada y en mal estado para el último periodo. Caso contrario a los escenarios de la política de control, que a partir del mismo percentil presentan una probabilidad de calidad de regular, donde se observa que con los parámetros de estos escenarios, la probabilidad de que el indicador ICA tome valores por debajo del 0.5 es depreciable. Como se expuso, la probabilidad de que el río se encuentre en condiciones malas en el año 20 para el escenario Base es de 39% mientras que en los escenarios de la política de control es del 8%.



**Gráfico 12. Comparación de los escenarios de la política de control y el escenario base. Fuente: Autores.**

Según el análisis y discusión de los resultados, se puede dar respuesta a la siguiente pregunta de investigación: ¿Cuál es el riesgo de que el Río Pance se convierta en un vertedero y no sea sostenible en un horizonte de 20 años, para lograr abastecer su demanda ambiental y consumo poblacional, replicando así la historia de los demás ríos de la ciudad? Donde se concluye que si se continua con la dinámica actual de consumo de agua, asociada al crecimiento urbano y generación de vertimientos, el río Pance no será sostenible a lo largo del tiempo, al verse afectada la calidad de sus aguas y por ende la pérdida de su funcionamiento y potencial hídrico. Las probabilidades encontradas en cuanto a las posibilidades de condiciones malas de calidad de agua en cada uno de los escenarios son significativas, es por esto, que se deben generar estrategias que permitan controlar el consumo del agua del río y la disposición de vertimientos a este. Puesto que, según los resultados para el escenario base, el valor del ICA para el año 20 asociado a una probabilidad del 39%, se encontraría en la categoría mala, es decir tomaría valores menores o iguales a 0.5, situación que vivencia actualmente el río Cañaveralejo de la ciudad de Cali, al presentar un valor del ICA de 0.28 para el año 2018 [20].



## 5 CONCLUSIONES

La motivación de este proyecto se basa en el análisis de la situación actual de otros ríos de la ciudad de Cali, como los son el Cañaveralejo, Aguacatal, Meléndez y Lili en comparación con la dinámica que presenta actualmente el río Pance. Estos ríos a lo largo del tiempo han sido testigos de la expansión territorial y el incremento de proyectos de urbanización. De igual forma, se ha presentado un aumento de la población aledaña a estos ríos, lo que se traduce en un mayor consumo del recurso hídrico para abastecer necesidades básicas. Sin embargo, dicha acción tiene un efecto en el estado natural de los ríos afectando así su capacidad hídrica y la calidad de sus aguas, debido a los diferentes contaminantes o vertimientos que genera la población. Este comportamiento, se evidencia en el río Pance, puesto que, además de su extensión y potencial hídrico, la zona donde está ubicado es considerada como una de las más atractivas de la ciudad como destino para vivir. Por lo tanto, se evaluó la sostenibilidad del río Pance con el fin de determinar en un horizonte de 20 años, cuál sería su estado futuro, es decir, si este podría seguir considerándose como uno de los ríos más grandes de la ciudad o si replicaría la historia de los demás ríos mencionados anteriormente.

Cabe mencionar la importancia de la metodología de Dinámica de Sistemas en el análisis del comportamiento de los sistemas hídricos, donde se logra comprender como los sistemas son afectados por diferentes variables tanto externas como internas. A través de esta herramienta se logra modelar o simular el dinamismo que afronta el río Pance en cuestión a la oferta y demanda del agua. En este estudio, se tuvieron en cuenta la interacción de los diferentes subsistemas que engloban el sistema general, estos son el sistema legislativo, poblacional, hídrico y de vertimientos. De igual forma, esta teoría ofrece esquemas de diagramación como el diagrama de subsistemas, causal y de niveles y flujos, que permiten articular el problema, establecer la hipótesis dinámica y las relaciones de retroalimentación entre las variables, como también realizar una estructura básica de un modelo formal de simulación, con el fin de obtener resultados que permitan diseñar políticas de control sobre las variables críticas del sistema, en este caso la regulación del consumo de agua del río, con respecto al crecimiento urbano que presenta el sector.

Con los diferentes escenarios de simulación planteados, se puede concluir que actualmente no existe un control sobre las captaciones de agua, que realizan los diferentes usuarios cercanos a la zona, lo anterior, puede deberse a que se considera que el recurso es ilimitado y no hay conciencia sobre su posible escasez. Asimismo, se obtuvo que la dinámica actual del Río Pance, asociada con el crecimiento poblacional y la generación de vertimientos, generará en un horizonte de 20 años con una probabilidad del 39%, una mala calidad del agua, es decir un deterioro del sistema hídrico, puesto que el índice de calidad de agua tomará valor menores o iguales a 0.5 según la clasificación del IDEAM. Esta situación se presenta actualmente en otros ríos de la ciudad, como lo expone el Informe de Caracterización de Aguas realizado por el DAGMA, donde cuatro ríos de la ciudad (Cali, Cañaveralejo, Aguacatal y Lili) para el año 2018 presentaban una calidad de agua regular y mala [22]. De los ríos mencionados, el río Cañaveralejo es aquel que actualmente presenta mayor deterioro, ya que al igual que el río Pance, es víctima de la contaminación por residuos derivados de proyectos de urbanización y vertimientos generados por la población, lo que ha afectado no solo la calidad de sus aguas sino también el nivel de su caudal [23]. De acuerdo con lo anterior, es necesario que las entidades ambientales ejerzan un control sobre la dinámica de consumo y generación de vertimientos que presenta el río Pance, puesto que al índice de calidad de agua de un río encontrarse en esta categoría, se dificulta su tratamiento para lograr ser consumido por la población; es por esto que se debe evitar replicar la historia de otros ríos de la ciudad y establecer planes de gestión y control de la cuenca con el fin de mantener su funcionalidad.

Dado que se identifica que el consumo derivado de las captaciones de agua, es aquella variable que reduce el nivel del recurso hídrico y por tanto aumentan las concentraciones de los vertimientos de la población, se sugiere una política de control con el fin de regular dicha variable y limitar el número de usuarios que están haciendo uso del agua. Con lo anterior, se busca normalizar este comportamiento y generar una estabilidad en el sistema, con el fin de mantener la calidad del agua y procurar la sostenibilidad del río. Es por esto que se recomienda que las entidades ambientales establezcan los límites con respecto a la captación del agua y al manejo y gestión de la cuenca, como también establecer un caudal máximo de consumo y procurar que los usuarios no sobrepasen este límite, dado que un exceso de consumo siempre tendrá a disminuir la calidad del agua del río y su caudal. Por otro lado, se propone como futuras exploraciones la generación de otras políticas de control, que, junto a esta, aporten a la sostenibilidad futura del río Pance, como por ejemplo con lo que respecta a los límites de disposición de vertimientos al río.

Por lo anterior, esta investigación permitió comprender el dinamismo actual que presenta el río Pance involucrando así el crecimiento poblacional de la comuna 22. Con el modelo de simulación planteado, se logra tener una visión de lo que podría ser el estado futuro del río Pance en un periodo de 20 años, si se continua con la demanda del recurso y la afectación de sus aguas. Por esta razón, en el estudio se realiza un análisis de la situación actual involucrado las variables críticas del sistema como lo son el crecimiento urbano, el consumo de agua y la contaminación, además de identificar sus límites para lograr generar políticas en cuanto a la regulación y control del caudal máximo permitido por usuario y el número de captaciones de agua aprobadas.

De acuerdo con los resultados del modelo, se tiene entonces, que, si no se controla las variables claves que son, el número de captaciones de agua, el caudal consumido por cada captación y el crecimiento urbano alrededor del Río, es muy probable

que el Río no sea sostenible en un periodo de 20 años y se repita la historia de los ríos Lili, Cañaveralejo o Aguacatal. Por ende, es importante que tanto las entidades encargadas del control y la gestión de la cuenca, como la población de la comuna 22, quienes se abastecen del agua del río Pance, comprendan la importancia de la preservación de los ecosistemas que se encargan de la provisión de los diferentes recursos, que son vitales para el desarrollo de la vida humana, dado que estos son limitados y la probabilidad de que escaseen está ligada a la actividad de consumo de quienes hacen uso de ellos.

#### **AGRADECIMIENTOS**

Los autores agradecen a todas las personas y entidades que colaboraron con la elaboración de este proyecto de investigación, en especial, al Departamento Administrativo de Gestión del Medio Ambiente- DAGMA, por su constante apoyo y brindar información relevante con respecto a la cuenca del río Pance.

## 6 BIBLIOGRAFÍA

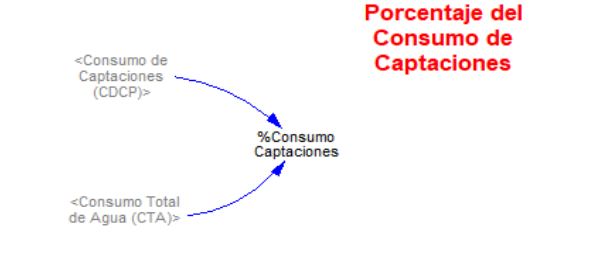
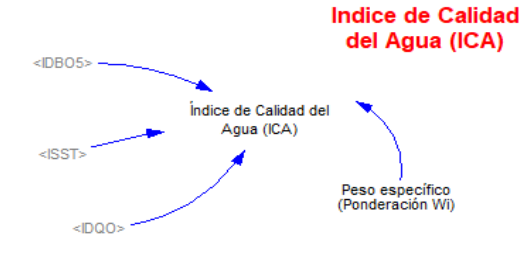
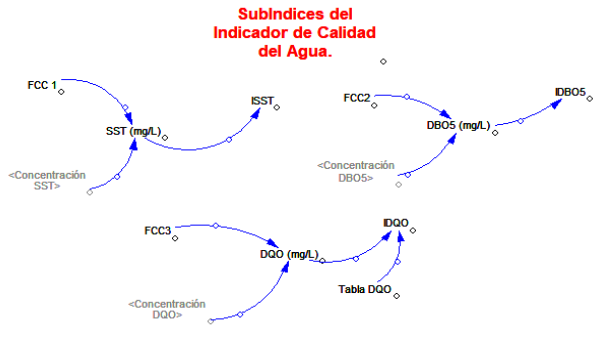
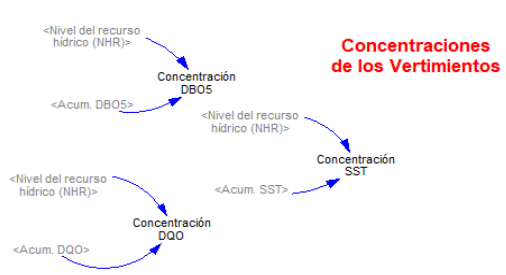
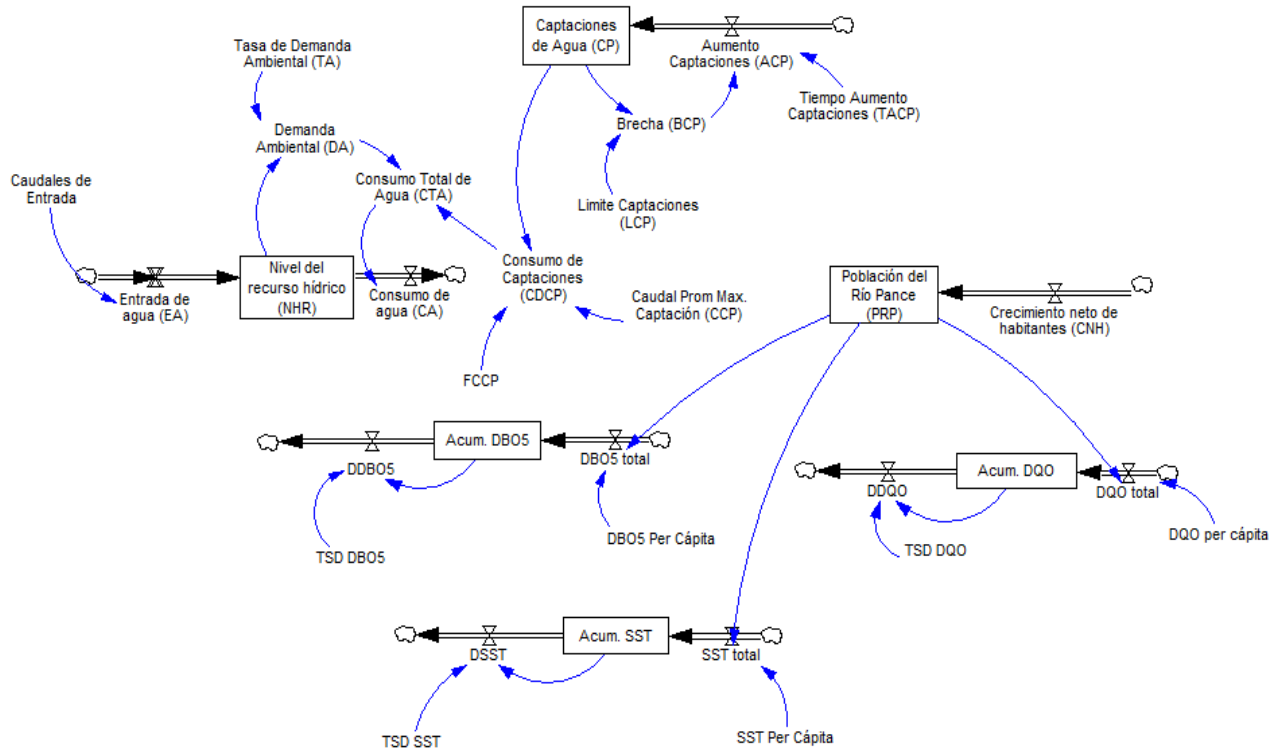
- [1] DAGMA, “Agenda Ambiental Comuna 22,” pp. 394–414, 2009.
- [2] C. V. Norberto *et al.*, “Estrategia de Manejo Ambiental de la Zona Media y Baja de la Subcuenca del Río Pance,” p. 33, 2016.
- [3] C. Rodriguez, “Los turistas no son la única amenaza del río Pance,” 2015. [Online]. Available: <http://blogs.elespectador.com/actualidad/el-rio/los-turistas-no-son-la-unica-amenaza-del-rio-pance>.
- [4] Alcaldía de Santiago de Cali, “Cali en Cifras,” Santiago De Cali, 2017.
- [5] EL TIEMPO, “Aguas del río Pance de Cali pasan a piscinas y acueductos,” 2017. [Online]. Available: <https://www.eltiempo.com/colombia/cali/aguas-del-rio-pance-de-cali-pasan-a-piscinas-y-acueductos-106908>.
- [6] J. A. Duran-Encalada, A. Paucar-Caceres, E. R. Bandala, and G. H. Wright, “The impact of global climate change on water quantity and quality: A system dynamics approach to the US–Mexican transborder region,” *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 256, no. 2, pp. 567–581, 2017.
- [7] L. Soliz, “Modelo de simulación para la identificación y cuantificación de los impactos ambientales producidos en el río Suches,” 2016.
- [8] R. M. Sánchez-román *et al.*, “Dynamic systems approach assess and manage water resources in river basins,” *Sci. Agric.*, vol. 66, no. 4, pp. 427–435, 2009.
- [9] Mabel Andrea Zabala Pérez, “ANÁLISIS DE ESTRATEGIAS DE DESARROLLO SOSTENIBLE A NIVEL DE UNA CUENCA HIDROGRÁFICA: APLICACIÓN DE LA DINÁMICA DE SISTEMAS AL CASO DE LA CUENCA DEL RÍO YUMBO,” 2011.
- [10] N. Niño and G. A. Restrepo, “Sostenibilidad Del Río Pance Como Recurso Hídrico: Una Aproximación Desde La Dinámica De Sistemas,” no. Cvc, 2016.
- [11] J. Mario, V. Rodríguez, A. Paola, and A. Calderón, “Metodología para el análisis de vulnerabilidad ante amenazas de inundación , remoción en masa y flujos torrenciales en cuencas hidrográficas Methodology for analysis of vulnerability for flood hazards , mass movements and watershed torrent flow Ciencia e,” pp. 109–136, 2017.
- [12] J. D. Sterman, *Business Dynamics: Systems thinking and modeling for a complex world*. 2000.
- [13] J. Forrester, “Modelado en dinamica de sistemas,” *Dinámica Sist.*
- [14] Universidad Nacional Autónoma de México, “Dinámica y retroalimentación.” [Online]. Available: <https://www.coursera.org/lecture/pensamiento-sistematico/dinamica-y-retroalimentacion-9dChT>.
- [15] J. Giraldo, Luisa; Hernández, María; Osorio, “La Tragedia Del Terreno Común, Un Arquetipo Sistémico Ilustrado a Través Del Uso De La Tierra En Actividades Agropecuarias,” *Esc. Ing. Ind. Fac. Ing. Univ. del Val.*, p. 19, 2015.
- [16] ATC-Innova, “Recursos de Vensim en español,” *Vensim®*, p. 19, 2007.
- [17] CVC, “Balance Oferta – Demanda De Cuenca del Río Lili,” no. figura 1, pp. 1–12, 2007.
- [18] Departamento Administrativo de Planeación, “Proyecciones de la población del municipio de Santiago de Cali 2006-2036.” .
- [19] IDEAM, “Capítulo 6. Calidad del agua superficial en Colombia,” *Ideam*, 2010.
- [20] DAGMA, “Informe De Caracterización De Aguas E Índice De Calidad De Agua De Los Ríos Aguacatal , Cali , Cañaveralejo , Lili , Meléndez Y Pance,” vol. 2017, pp. 1–62, 2017.
- [21] Centro de Investigaciones en Ingeniería Ambiental- Universidad de los Andes, “Concentraciones de referencia para los vertimientos industriales realizados a la red de alcantarillado y de los vertimientos industriales y domésticos efectuados a cuerpos de agua de la ciudad de Bogotá.”
- [22] Dagma, *Departamento Administrativo De Gestion Del Medio Ambiente – Informe De Caracterización De Aguas*

*E Índice De Calidad De Agua De Los Ríos Aguacatal , Cali , Cañaveralejo , Lili , Meléndez Y Pance*, vol. 2012. 2018.

- [23] Periódico El País, “Seis de los siete ríos de Cali tienen baja calidad de agua: Personería,” 2015. [Online]. Available: <https://www.elpais.com.co/cali/seis-de-los-siete-rios-de-tienen-baja-dad-de-agua-personeria.html>.

# ANEXOS

## Anexo 1. Modelo de simulación Sostenibilidad del Río Pance.



**Anexo 2. Resultados del ICA para los diferentes escenarios**

Índice de Calidad del Agua (ICA)				
Período (Año)	Escenario Base 1	Escenario 1.1	Escenario 1.2	Escenario 1.3
0	0.773367	0.773367	0.773367	0.773367
1	0.862708	0.865998	0.864938	0.860429
2	0.837269	0.850265	0.842668	0.831567
3	0.851388	0.867299	0.858054	0.844254
4	0.871896	0.97138	0.878773	0.864519
5	0.867446	0.970999	0.87587	0.858261
6	0.862356	0.970639	0.872309	0.851323
7	0.855272	0.8822	0.86691	0.84213
8	0.824352	0.861598	0.840912	0.804586
9	0.790859	0.841842	0.814365	0.643701
10	0.81352	0.857845	0.833606	0.721858
11	0.722368	0.844194	0.814744	0.638065
12	0.702832	0.834616	0.800617	0.608241
13	0.606796	0.81399	0.652723	0.42462
14	0.634774	0.82755	0.722129	0.476287
15	0.612667	0.818312	0.707658	0.433323
16	0.612408	0.818777	0.70784	0.43168
17	0.650351	0.836778	0.800742	0.600219
18	0.606182	0.816837	0.654244	0.416879
19	0.6143	0.820308	0.709514	0.434243
20	0.495685	0.812796	0.647774	0.346692