



**Evaluación de la Hidrodinámica del sector sur del Humedal Gualí**

**Marlly Tatiana Pérez Vargas**

**Universidad Antonio Nariño**

**Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental**

**Ingeniería Civil**

**Bogotá D.C., Colombia**

**2020**

**Evaluación de la Hidrodinámica del sector sur del Humedal Gualí**

Proyecto de investigación

**Marlly Tatiana Pérez Vargas**

Tesis Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

Ingeniero Civil

Director

Ph. D, Juan Pablo Rodríguez Rincón

Universidad Antonio Nariño

Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental

Ingeniería Civil

Bogotá D.C., Colombia

2020

## PÁGINA DE ACEPTACIÓN

---

---

---

---

---

NOTA DE ACEPTACIÓN

Vanessa Rodríguez Rueda  
**Jurado**

Raúl Echeverry  
**Jurado**

**Lugar de desarrollo del trabajo de grado:**  
Bogotá, Colombia.  
Universidad Antonio Nariño, Sede sur.

**TUTOR DE TESIS**  
Ph D. JUAN PABLO RODRÍGUEZ RINCÓN

Bogotá D.C., Junio 2020

## Dedicatoria y agradecimientos

*Quiero dedicar este trabajo principalmente a Dios, a mis padres y hermano, por el apoyo, cariño, paciencia y confianza que al pasar estos años depositaron en mí; fueron, han sido y serán los pilares y motor de mi vida, a mi familia y amigos por su apoyo y total confianza, por creer en mí y animarme hasta el último momento desde cualquier parte de Colombia o el mundo. Adicionalmente agradezco a la Universidad Antonio Nariño y a todos mis docentes, porque no sólo me han formado como profesional sino que aportaron a mi crecimiento personal, un agradecimiento especial al profesor Jonathan Losada, que definitivamente sin sus conocimientos esta tesis no hubiera sido posible.*

*Y finalmente, no podría estar más agradecida con el profesor Juan Pablo Rodríguez, ya que sin su conocimiento, apoyo, guía, acompañamiento y sobre todo, paciencia, me hubiera rendido a medio camino.*

# CONTENIDO

Resumen .....	1
Abstract .....	2
Introducción .....	3
1. Justificación .....	5
2. Objetivos .....	8
2.1. Objetivo general .....	8
2.2. Objetivos específicos .....	8
3. Marco teórico .....	9
3.1. La naturaleza de los humedales .....	9
3.2. Humedal .....	10
3.3. Tipos de humedales .....	11
3.3.2. Estuarios .....	12
3.3.3. Lacustres .....	13
3.3.4. Ribereños .....	13
3.3.5. Palustres .....	14
3.4. Características físicas de los humedales .....	15
3.4.1. Calidad del agua .....	15
3.5. Humedales en Colombia .....	16
3.6. Hidrodinámica de un humedal .....	18
3.7. Hidrometría .....	19
3.8. Evaluación de flujos (Hidrodinámica) .....	19
3.8.1. Iber .....	20
4. Estado del arte .....	21
4.1. Modelación hidrodinámica .....	22
4.2. Aplicación modelos hidrodinámicos .....	25
4.2.1. Inundaciones .....	26
4.2.2. Hidrodinámica en humedales .....	28
5. Metodología .....	30
5.1. Identificación .....	30
5.1.1. Identificación del problema .....	30
5.1.2. Delimitación zona de estudio .....	31
5.2. Recolección de información .....	33
5.2.1. Batimetría .....	33

5.2.2.	Climatología .....	33
5.2.3.	Temperatura .....	35
5.2.4.	Hidrología .....	37
5.2.5.	Descripción hidrológica .....	38
5.3.	Puesta a punto de modelo.....	41
5.3.1.	Modelo de Elevación Digital .....	41
5.3.2.	Generación de la malla de cálculo.....	42
5.3.3.	Condiciones de contorno.....	43
5.3.4.	Proceso .....	45
5.4.	Resultados .....	46
6.	Conclusiones y Recomendaciones.....	54
7.	Referencias.....	57
Anexos	.....	69
a.	Listado de coordenadas batimétricas del humedal Gualí .....	69
b.	Registros de la estación climatológica La Ramada.....	69

## Lista de tablas

<i>Tabla 1. Ubicación del humedal Guali-Tres Esquinas-Funzhe. Fuente: (CAR, 2018).</i>	6
<i>Tabla 2. Coordenadas zona de estudio.</i>	32
<i>Tabla 3. Estaciones climatológicas utilizadas. Fuente: (CAR, 2016)</i>	33
<i>Tabla 4. Balance hídrico Sector Sur. Fuente: (CAR, 2016)</i>	38

## Lista de figuras

<i>Figura 1. Amenazas del Humedad Gualí. Tomado de: (El espectador, 2014)</i>	4
<i>Figura 2. Ubicación Humedales de Guali, Tres Esquinas y Lagunas del Funzhe. Fuente propia.</i>	6
<i>Figura 3. Beneficios de los humedales. Fuente: (Ramsar, 2006)</i>	9
<i>Figura 4. Componentes básicos de un humedal Fuente: (W. J. Mitsch &amp; Gosselink, 2001)</i>	11
<i>Figura 5. Humedal costero Fuente: (Ramsar, 2006)</i>	12
<i>Figura 6. Estuario del río Massa, Marruecos. Fuente: (Gardner, 2015)</i>	13
<i>Figura 7. Sistema lacustre de Mojanda. Fuente: Google eart.</i>	13
<i>Figura 8. Esquemas en planta de los posibles tipos de humedales ribereños. Fuente: (García Rodríguez, 2003).</i>	14
<i>Figura 9. Esquema básico de un humedal. Fuente: (Alcorlo, 2012)</i>	15
<i>Figura 10. Humedales RAMSAR en Colombia. Fuente propia.</i>	17
<i>Figura 11. Estado del humedal Gualí. Fuente:(Coratierras, 2017)</i>	31
<i>Figura 12. Zona de estudio en amarillo. Fuente propia</i>	32
<i>Figura 13. Ubicación estaciones climatológicas. Fuente propia</i>	34
<i>Figura 14. a. Modelo de elevación digital. b. Sector norte del humedal c. Sector medio del humedal. d. Sector sur del humedal. Fuente: propia.</i>	41
<i>Figura 15. Malla de cálculo zona de estudio en Iber. Fuente propia.</i>	42
<i>Figura 16. Identificación y ubicación cuencas del humedal, entradas (punto rojo) y salidas (punto azul) del área de estudio. Fuente propia.</i>	43
<i>Figura 17. Calado del área de estudio. Fuente propia.</i>	46
<i>Figura 18. Campo de velocidades del área de estudio. Fuente propia.</i>	47
<i>Figura 19. Detalle zona de estrangulamiento en la parte superior del área de estudio. Fuente propia.</i>	48
<i>Figura 20. Imagen satelital sección del humedal en los años a. 2015 b. 2019 Fuente google earth.</i>	48
<i>Figura 21. Campo de velocidades en vectores. Fuente propia.</i>	49
<i>Figura 22. Comportamiento de la cota de agua en los diferentes pasos. Fuente propia.</i>	50
<i>Figura 23. Comportamiento Froude en el humedal paso 5700. Fuente propia.</i>	51
<i>Figura 24. Comportamiento Froude en el humedal paso 13800. Fuente propia.</i>	51

## Lista de diagramas

<i>Diagrama 1. Fases de la metodología para el desarrollo del trabajo de grado. Fuente propia.....</i>	<i>30</i>
--	-----------

## Lista de graficas

<i>Gráfica 1. Temperatura máxima mensual. Fuente: (CAR, 2019).....</i>	<i>35</i>
<i>Gráfica 2. Temperatura media mensual. Fuente: (CAR, 2019).....</i>	<i>36</i>
<i>Gráfica 3. Temperatura mínima mensual. Fuente:(CAR, 2019).....</i>	<i>36</i>
<i>Gráfica 4. Días mensuales de precipitación Fuente: (CAR, 2019).....</i>	<i>39</i>
<i>Gráfica 5. Precipitación total mensual. Fuente:(CAR, 2019).....</i>	<i>40</i>
<i>Gráfica 6. Evaporación total mensual multianual. Fuente:(CAR, 2019).....</i>	<i>40</i>
<i>Gráfica 7. Hidrograma Sector Nororiental. Información tomada del informe plan y diagnostico Gualí (CAR, 2016) Fuente propia.....</i>	<i>44</i>
<i>Gráfica 8. Hidrograma sector noroccidental. Información tomada del informe plan y diagnostico Gualí (CAR, 2016) Fuente propia.....</i>	<i>44</i>
<i>Gráfica 9. Hidrograma sector Sur. Información tomada del informe Plan y diagnostico Gualí (CAR, 2016) Fuente propia.....</i>	<i>45</i>

---

## Resumen

El humedal Gualí, constituye un espacio para la investigación y resguardo de cientos de especies, es una fuente importante de agua para el sector agropecuario de municipios como Funza, Tenjo y Mosquera (Henaó Sarmiento, 2004), también es empleado como receptor de aguas residuales de estos municipios, superando la capacidad resiliente del sistema. Es indudable que el comportamiento de las aguas determina los beneficios que brinda el humedal, y su conocimiento es primordial para su cuidado y recuperación. Actualmente el humedal se encuentra en una situación dramática debido a problemas ocasionados al ser receptor de basura y materiales de relleno por parte de propietarios de zonas aledañas, por el avance de los potreros sobre el espejo de agua disminuyendo el mismo y la contaminación por vertimientos domésticos e industriales, entre otros.

La importancia de la evaluación del comportamiento hidrodinámico de un humedal y más cuando se encuentran cercanos a llanuras de inundación es que desempeñan un papel clave en el mantenimiento del estado ecológico de este. Se caracterizan por una alta biodiversidad, además la preservación y restauración de los humedales se ha convertido en un tema importante no solo en el país, sino también a nivel mundial (e.g. (Ramsar, 2016)). Dos de las principales ventajas de tener humedales es que reducen los picos de inundación y proporcionan hábitats para especies en peligro de extinción, por lo tanto, deben conservarse e incluirse en los planes de manejo.

Por tal motivo se emplea la modelación para el sector sur del Humedal Gualí en dos dimensiones implementando el software de uso libre Iber, este software resuelve las ecuaciones de aguas someras promediadas en profundidad, también conocidas como 2D Shallow Water Equations (2D-SWE) o ecuaciones de St. Venant bidimensionales. Dichas ecuaciones asumen una distribución de presión hidrostática y una distribución relativamente uniforme de la velocidad en profundidad (Bladé et al., 2014a), y en este caso se buscará conocer su comportamiento para así poder realizar un análisis y poder llegar a soluciones para su restauración y protección.

*Palabras claves: Gualí, Hidrodinámica, Iber, Humedales, Bidimensional.*

---

## Abstract

The Gualí wetland, constitutes a space for research and protection of hundreds of species, is an important source of water for the agricultural sector of municipalities such as Funza, Tenjo and Mosquera (Henao Sarmiento, 2004), it is also used as a wastewater receiver of these municipalities, surpassing the resilient capacity of the system. There is no doubt that the behavior of the waters determines the benefits provided by the wetland, and its knowledge is essential for its care and recovery. Currently the wetland is in a dramatic situation due to problems caused by being the recipient of garbage and filling materials by owners of neighboring areas, due to the advance of paddocks on the water mirror, reducing it and contamination by domestic dumping. and industrial, among others.

The importance of evaluating the hydrodynamic behavior of a wetland and more when they are close to floodplains is that they play a key role in maintaining the ecological status of the wetland. They are characterized by high biodiversity, and the preservation and restoration of wetlands has become an important issue not only in the country, but also worldwide (e.g. (Ramsar, 2016)). Two of the main advantages of having wetlands are that they reduce flood peaks and provide habitats for endangered species, therefore they must be conserved and included in management plans.

For this reason, the two-dimensional modeling for the southern sector of the Gualí Wetland is used, implementing the free software Iber, this software solves the shallow water averages equations in depth, also known as 2D Shallow Water Equations (2D-SWE) or two-dimensional St. Venant equations. These equations assume a hydrostatic pressure distribution and a relatively uniform velocity distribution at depth (Bladé et al., 2014a), and in this case we will seek to know their behavior in order to be able to carry out an analysis and come up with solutions for their restoration and protection.

*Key words: Gualí, Hydrodynamics, Iber, Wetlands, Bidimensional.*

---

## Introducción

En el desarrollo de este Proyecto de Investigación en el semillero de investigación de la Universidad Antonio Nariño: Análisis y modelación de fuentes fluviales y marítimas, se encontró que los humedales son de gran importancia para la humanidad, ya que son uno de los entornos más productivos del mundo, además de ser cunas de diversidad biológica, fuentes de agua y productividad primaria de las que innumerables especies vegetales y animales dependen para subsistir. Sin embargo, diferentes estudios han comprobado que la calidad y extensión de los humedales continua disminuyendo en el mundo, causando que estos ecosistemas se encuentren en peligro (Ramsar, 2016).

La conservación de los humedales ofrece una gran variedad de beneficios de gran valor económico, social y pueden contribuir a abordar una amplia gama de necesidades y objetivos. Los humedales actúan como sumideros de carbono, con lo cual contribuyen a mitigar el cambio climático (Brink, Russi, Farmer, & Badura, 2013). Asimismo, los humedales regulan el transporte de sedimentos, ayudando a la formación y estabilidad de tierras. También pueden desempeñar importantes funciones de cría de peces y constituir una fuente importante de proteínas, medios de subsistencia, materiales y combustible.

Debido a la privilegiada posición geográfica, Colombia es un país de Humedales, según el Ministerio de Ambiente, de los 1124 municipios que tiene Colombia, 1094 cuentan con humedales; es decir, el 87 % de la población del país convive con los humedales, lo que representa alrededor de 29 millones de personas (MinAmbiente, 2015). Los humedales que existen en la Sabana y el Distrito Capital, pertenecen a la Cuenca del Río Bogotá y hacen parte del Sistema geográfico del Altiplano Cundiboyacense, el más importante al norte de la cordillera de los Andes (Moreno, García, & Carlos Villalba, 2000).

A pesar de la importancia anteriormente mencionada, la contaminación y destrucción de los humedales han sido de los principales factores que han contribuido en el rápido deterioro de los recursos hídricos del país (Vasco & Sanchez, 2017); como es el caso del Humedal Gualí Tres Esquinas, que sin importar las medidas que se han tomado para su recuperación y conservación, se ha visto afectado por el crecimiento Industrial en la zona. Estos ecosistemas son elementos fundamentales de las cuencas hidrográficas y para que la gestión ambiental pueda enfocarse es importante que las funciones, servicios y beneficios de los humedales sean recuperados y conservados.



Figura 1. Amenazas del Humedad Gualí. Tomado de: (El espectador, 2014)

---

## 1. Justificación

Es primordial conocer la dinámica de los cuerpos hídricos y aún más de aquellos que se encuentran cerca a los diferentes municipios del país, no solo por su importancia ecológica y los servicios ambientales que estos ofrecen, sino para también conocer la relación entre las presiones que ejercen la actividad de las comunidades y el estado de la calidad del agua del humedal, y así poder determinar los factores más influyentes en las problemáticas que presenta el medio.

Además, estas aguas lenticas son de gran importancia para las comunidades vecinas, ya que tienen cualidades como el almacenamiento de agua, asimilación de contaminantes, control de la erosión, recarga y descarga de acuíferos, y no menos importante, la regulación del ciclo hidrológico, entre otros, sin embargo estas comunidades aledañas interfieren en el equilibrio del ecosistema generando impactos negativos con altas cargas contaminantes que el mismo medio no es capaz de asimilar. Pese a que en el país varias entidades y autoridades ambientales han ejercido acciones de control y vigilancia ante las intervenciones del hombre (CAR, 2016), es fundamental que se reconozca la importancia que tienen estos humedales y se identifiquen las intervenciones que dan lugar a alteraciones y degradación del ecosistema y todos sus componentes (fauna y flora) para que se cree conciencia y se haga un aprovechamiento responsable de los recursos y servicios del mismo.

Como se sabe, debido a la llegada de la industria a los municipios de Tenjo, Funza y Mosquera se ha venido transformando el ecosistema del Humedal (Figura 1.), lo cual ha generado un importante impacto ecológico ambiental al convertirse en receptor de aguas negras, generando una disminución en la disponibilidad del oxígeno y de la biodiversidad, aumentando la producción del metano, contribuyendo así al calentamiento global (Calderón Sáenz, 2009).

Los métodos para que un ingeniero pueda diseñar y evaluar algún sistema, en cuanto a la dinámica de fluidos, son la experimentación como modelo físico y el cálculo como modelo matemático (Cimbala & Cengel, 2006). El análisis con modelos numéricos más poderosos están disponibles en 2D y 3D, que según (Chung, 2001) al introducir información correcta, arrojan resultados cuantitativos y cualitativos más precisos, disminuyendo la incertidumbre, permitiendo mejores diseños, lo cual podría evitar errores costosos a la hora de ser construidos.



Figura 2. Ubicación Humedales de Guali, Tres Esquinas y Lagunas del Funzhe. Fuente propia.

Extremo	X (Este)	Y (Oeste)
Norte	984.364,26	1.021.749,61
Sur	984.663,49	1.011.031,98
Oriente	989.123,85	1.014.807,60
Occidente	983.290,72	1.012.024,12

Tabla 1. Ubicación del humedal Guali-Tres Esquinas-Funzhe. Fuente: (CAR, 2018).

---

Teniendo en cuenta lo mencionado anteriormente, la falta de información del comportamiento de este tipo de ecosistemas, no solo perjudica al sinnúmero de especies de flora y fauna que se benefician del buen estado de estos, sino también a las diferentes poblaciones del mundo, que sin saber se encuentran siendo favorecidos de ellos, pese a las diversas estrategias de gestión ambiental y desarrollo sostenible que se han formulado como los planes para el manejo de estos ecosistemas, no se evidencia en términos generales, impactos positivos sobre las condiciones de los humedales; como el Humedal Ciénaga Grande del Ríos Sinú (Burgos Doria, 2015) y los parques ecológicos distritales de Humedal como La Vaca, Capellanía, La Conejera, El Burro, Torca, Fúquene y Cucunuba entre otros (Hernández, 2010), por este motivo se plantea la evaluación hidrodinámica del humedal Gualí, con el fin de buscar soluciones definitivas para la protección de, no solamente de este humedal, sino de todos los que se vean afectados por algún tipo de amenaza producida por el hombre.

Con este fin, esta tesis se realiza con la ayuda del software Iber, buscando, principalmente, incentivar su aplicación en el estudio de la hidrodinámica en cuerpos de agua lenticos, ya que es de un software libre y se encuentran muchos documentos guía para su uso y estudio, no solo en el módulo de calidad de aguas sino aplicaciones en general, además maneja dos dimensiones y para el objeto de estudio se requiere más precisión en factores como la morfología y las velocidades que determinan con certeza y proximidad el estado del medio (Bladé et al., 2014a), creando casos hipotéticos para la calidad del agua y así mismo poder generar escenarios de solución, mitigación o corrección ideales ante las principales problemáticas a las que se expone el humedal.

---

## **2. Objetivos**

### **2.1. Objetivo general**

Realizar una caracterización hidrodinámica de la zona sur del Humedal Gualí.

### **2.2. Objetivos específicos**

- Elaborar un estado del conocimiento acerca de la hidrodinámica de humedales.
- Utilizar información topobatimétrica e hidrológica para evaluar el comportamiento hidrodinámico del área de estudio.
- Realizar análisis de los resultados de la modelación hidrodinámica de la zona sur del humedal Gualí.

### 3. Marco teórico

#### 3.1. La naturaleza de los humedales

Absolutamente todo proceso de la vida depende del agua: desde el desarrollo y crecimiento de las plantas, la reproducción de algunos animales hasta la continuidad de la vida humana. Entender su funcionamiento y tomar conciencia de los ciclos de vida asociados con ellos son los primeros y más importantes pasos para apropiarse de estos ambientes y gestionarlos sin alterar su funcionamiento (Jaramillo Villa, Cortés Duque, & Flórez Ayala, 2015).



Figura 3. Beneficios de los humedales. Fuente: (Ramsar, 2006)

---

## 3.2. Humedal

Los humedales son zonas donde el agua es el principal factor controlador del medio, además de la vida vegetal y animal asociada a él. Los humedales se dan donde la capa freática se halla en la superficie terrestre, cerca de ella o donde la tierra está cubierta por aguas poco profundas (Ramsar, 2016).

Con frecuencia, estos ecosistemas son áreas de tierra que están húmedas la mayor parte del tiempo, se encuentran en depresiones (terrenos de pendientes bajas) o en áreas con pendientes altas y suelos de baja permeabilidad. En otros casos, los humedales se pueden encontrar en alturas topográficas o entre drenajes de corrientes cuando la tierra está "pobrementemente drenada" (Kadlec & Wallace, 2009).

En general, los humedales son zonas con suelos saturados, en donde se evidencia la acumulación de material orgánico que al descomponerse abastece a gran diversidad de especies de plantas y animales adaptados a este tipo de condiciones. (Hincapié Marín, 2007) señala que la definición de un humedal se puede dar con base a tres componentes:

- Suelo: se diferencia de otros sistemas debido a que tienen un suelo muy característico
- Agua: superficial o subsuperficialmente siempre se encuentra presente, debe saturar el suelo
- Vegetación: el sistema brinda soporte a la vegetación, la cual está adaptada a condiciones húmedas, además estas especies de plantas junto con el suelo, albergan un sin número de organismos.

Teniendo en cuenta los componentes anteriormente mencionados, se puede explicar con mayor claridad la definición de un humedal a través de la Figura 4.

Existen dos factores, el clima y la geomorfología, los cuales ayudan a definir los humedales, pero todo inicia a partir de la hidrología, esta afecta de manera físico-química el ambiente, y además junto con el suelo determina cuanta vida se puede encontrar en el humedal.

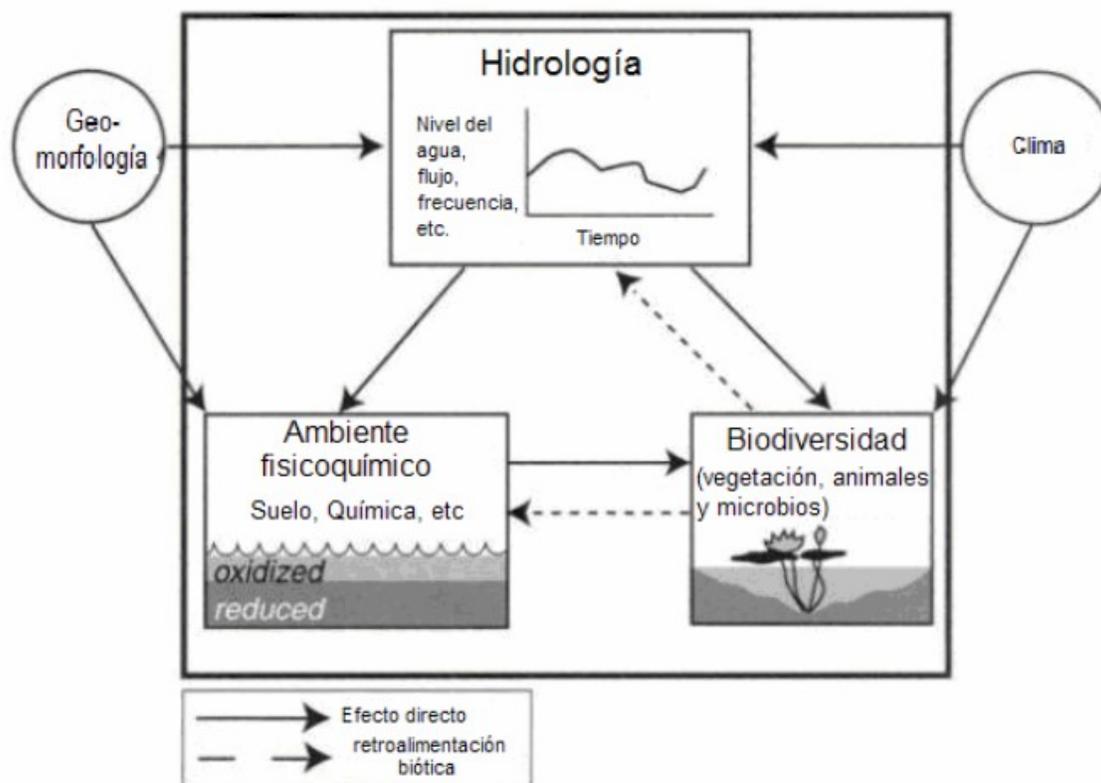


Figura 4. Componentes básicos de un humedal Fuente: (W. J. Mitsch & Gosselink, 2001)

### 3.3. Tipos de humedales

Los humedales son una compleja combinación de agua, substrato, plantas, larvas de insectos y gusanos, y un sin número de organismos, todo esto trabaja en función de la descontaminación del agua. Hay varios tipos de humedales: humedales de flujo superficial, humedales de flujo subsuperficial (Chazarenc, Merlin, & Gonthier, 2003) y sistemas híbridos que incorporan flujo superficial y subsuperficial, pero en general, se reconocen cinco tipos de humedales principales.

---

### 3.3.1. Marinos

Humedales costeros, también llamados lagunas costeras, costas rocosas y arrecifes de coral, según (Ramsar, 2006) se consideran humedales marinos aquellos que alcanzan una profundidad de hasta seis metros en marea baja (esta cifra corresponde a la profundidad máxima a la que se pueden sumergir los patos marinos en busca de alimento) (e.g. (Kjerfve & Magill, 1989); (Dade, 1993)).



*Figura 5. Humedal costero Fuente: (Ramsar, 2006)*

### 3.3.2. Estuarios

Un estuario (Figura 6) es donde debido a las mareas existe un intercambio de agua salada y agua dulce, causado por la desembocadura en el mar de un río amplio y profundo. Suele tener playas a ambos costados, en las que la retirada de las aguas permite el crecimiento de algunas especies vegetales que soportan aguas salinas (Escobar, 2002).



*Figura 6. Estuario del río Massa, Marruecos. Fuente: (Gardner, 2015)*

### **3.3.3. Lacustres**

Son aquellas zonas que de manera permanente están cubiertas de agua con baja circulación. Un ejemplo de ellos son los lagos glaciales de volcanes y lagunas en general, según (Gardner, 2015) son los humedales asociados con lagos.



*Figura 7. Sistema lacustre de Mojanda. Fuente: Google eart*

### **3.3.4. Ribereños**

Los humedales ribereños comprenden los ecosistemas de llanura de inundación, los cuales se caracterizan por la inundación de agua superficial o la

---

permanencia de un nivel freático somero, según (Gardner, 2015) pueden ser humedales adyacentes a ríos y arroyos.

Deben ser considerados como ecosistemas complejos, siendo el resultado de la interacción de factores climáticos, topográficos, morfológicos, litológicos e hidrológicos y, debe tenerse claro que pequeñas modificaciones sobre alguno de esos factores podría contribuir a cambios irreversibles en su funcionamiento (e.j. (García Rodríguez, 2003)).

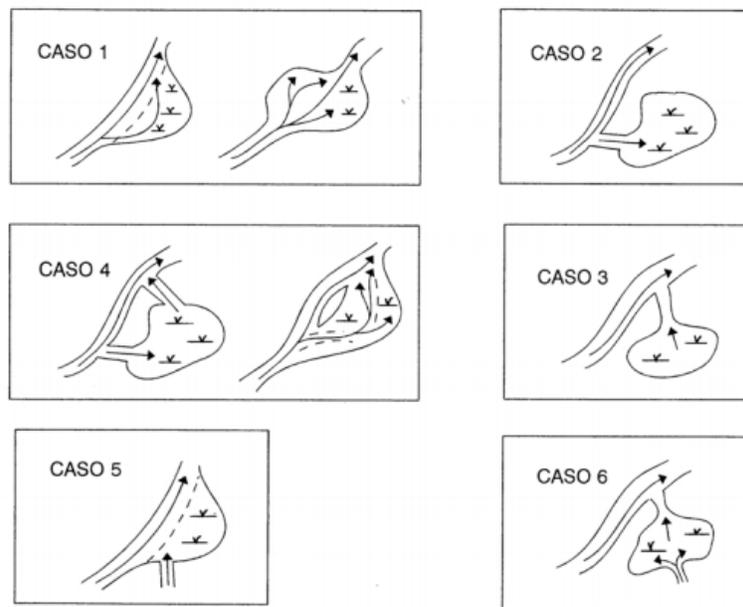


Figura 8. Esquemas en planta de los posibles tipos de humedales ribereños. Fuente: (García Rodríguez, 2003)

### 3.3.5. Palustres

Según (Gardner, 2015) humedales palustres, es decir, “pantanosos”, marismas, pantanos y ciénagas. Su existencia, como en los humedales ribereños se debe a la interacción de diferentes factores, como el clima, relieve y régimen hídrico, de manera que el exceso de humedad debe ser lo suficientemente importante como para afectar a los procesos físico-químicos y biológicos (Alcorlo, 2012).

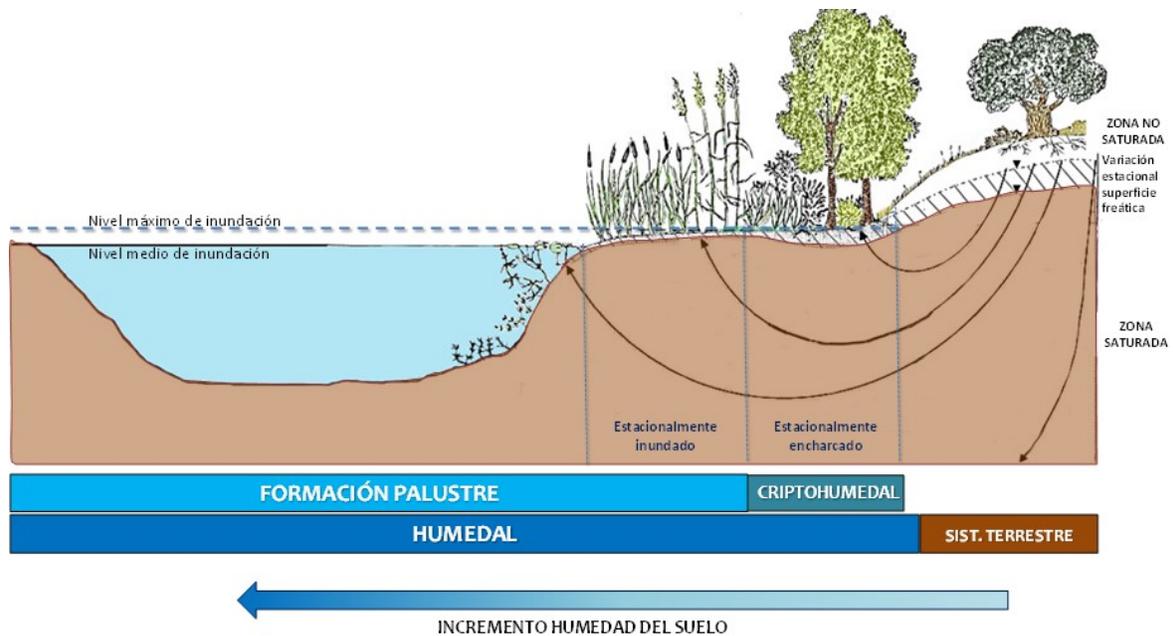


Figura 9. Esquema básico de un humedal. Fuente: (Alcorlo, 2012)

### 3.4. Características físicas de los humedales

La Convención Relativa a los Humedales de Importancia Internacional (Ramsar, 2006), señala que existen características físicas principales que generalmente son consideradas en la identificación de un humedal:

- Debe presentar una lámina de agua de poca profundidad o agua subterránea próxima a la superficie del terreno.
- El suelo debe ser saturado de agua de manera permanente.
- El terreno debe mantener de forma predominante una vegetación acuática.
- Los humedales son espacios de transición, de escasa profundidad y de naturaleza cambiante.

#### 3.4.1. Calidad del agua

Se trata de la condición del agua (características químicas, físicas o biológicas del agua), y con el impacto que esta puede tener en una o más especies acuáticas, o en usos humanos, ya sea para consumo o de uso

---

recreativo. Suele evaluarse la calidad del agua, debido al interés en la salud de los ecosistemas, la seguridad del contacto humano y el agua potable (Rock & Rivera, 2014), en sus trabajos de grado (Vasco & Sanchez, 2017) y (García Rodríguez & Ruíz Gomez, 2018) realizan estudios de calidad del agua al Humedal Gualí.

### **3.5. Humedales en Colombia**

Colombia es un país megadiverso con una vasta riqueza de fuentes hídricas, cabe resaltar que cuenta con el 60% de los páramos del mundo y cerca de 31.702 humedales; de los cuales estos últimos se encuentran gravemente amenazados por el uso inapropiado de los recursos (Rangel, 2015), la contaminación del agua debido a la inadecuada disposición de residuos tanto sólidos como líquidos, la desecación, el crecimiento industrial, las actividades agropecuarias y el acelerado crecimiento urbano han convertido a los humedales en ecosistemas en riesgo, teniendo en cuenta lo anterior se hace necesario plantear la importancia de estos dentro de la hidrodinámica y el equilibrio ecológico del país para incentivar su protección, recuperación y cuidado, ya que ni las mismas administraciones locales tienen información completa y actualizada disponible de los humedales.

Teniendo en cuenta lo anterior, el país cuenta con un total de 31.702 humedales, es decir que un 27% del territorio Colombiano está conformado por humedales (Jaramillo Villa et al., 2015), a pesar de ello pocos de estos ecosistemas cuentan con protección y aún menor es la cifra de ecosistemas que cuentan con la designación como humedal Ramsar, la cual es una designación de reconocimiento de importancia ecológica de estos ecosistemas de manera nacional e internacionalmente, sin embargo en los últimos años la cifra asciende a doce sitios Ramsar como se puede ver en la figura 10.

# Humedales RAMSAR en Colombia



Figura 10. Humedales RAMSAR en Colombia. Fuente propia.

En Colombia, los humedales son considerados ecosistemas estratégicos, ya que cumplen un papel esencial en la regulación hídrica en especial durante periodos de extrema lluvia o sequía, además contribuye al almacenamiento de agua, la regulación de caudales (acumulan y retienen agua en épocas de creciente), la recarga de aguas subterráneas, la fijación de dióxido de carbono y la retención y aporte de sedimentos y nutrientes. A pesar de esto, se ven afectados en su mayor parte por la ganadería y la agricultura (Humboldt, 2017).

---

### 3.6. Hidrodinámica de un humedal

Debido a las diferencias en la topografía del paisaje, la hidrología y la vegetación, los humedales varían en un amplio rango y dependen en gran medida de su configuración hidrológica en entornos fluviales, lacustres o palustrinos, influenciados por la dispersión espacial y temporal, el flujo y las características fisicoquímicas de las aguas superficiales y subterráneas. (Keddy, 2010). Es decir, el movimiento del agua en el mismo determina patrones que sustentan el equilibrio sedimentológico del humedal, además, de las distribuciones bióticas. Además, las condiciones hidrológicas de los humedales influyen en el ciclo local del agua y los procesos hidrológicos (Zhang, Wang, & Wang, 2011).

En su artículo *Evaluación hidrodinámica del hábitat ecohidráulico dirigida a la conservación y restauración de hidrosistemas fluviales* (Diez-Hernández, 2008) menciona que debido al rápido desarrollo de la dinámica computacional de fluidos durante los últimos años, se han empezado a popularizar las herramientas de modelación hidrodinámica, gracias a su descripción mucho más detallada de los campos hidráulicos ((Katopodis, 2003); (Shen & Diplas, 2008)). Las soluciones numéricas bidimensionales (2D) y tridimensionales (3D) generan dominios espacialmente explícitos de confiabilidad y alta resolución que superan las aproximaciones simplificadas unidimensionales clásicas (1D). Dicho esto, (Diez-Hernández, 2008) señala que la predicción cinemática mejorada del microambiente hidráulico se utiliza en distintas ramas de la hidroingeniería, y también en la simulación del entorno que percibe un organismo acuático y que conforma su hábitat físico: la ecohidráulica constituye, por tanto, un nuevo ámbito interdisciplinar en la dinámica computacional de fluidos.

Como se sabe las funciones de los humedales pueden verse fácilmente afectadas en áreas de fuerte desarrollo humano, además de la falta de interés y

---

desinformación que existe acerca de estos cuerpos hídricos ((Riddell, Everson, Clulow, & Mengistu, 2013); (Rosenberry & Hayashi, 2013)), por eso es de suma importancia hacer uso de las soluciones numéricas en una, dos y hasta tres dimensiones para poder analizar el comportamiento y evolución hidrodinámica de estos ecosistemas ((Du, Park, Dellapenna, & Clay, 2019); (McCauley, Anteau, van der Burg, & Wiltermuth, 2015); (Vidal & Delgado, 2013)).

### **3.7. Hidrometría**

Es la parte aplicada de la hidrodinámica, que tiene por objeto los métodos de medición de la velocidad, caudales y fuerzas de los líquidos en movimiento, es decir la medición del volumen de agua que pasa por unidad de tiempo por una sección transversal de un río, canal o tubería.

Como menciona (MAR Perú, 2013) “su importancia radica en que esta permite proveer de datos oportunos y veraces que una vez procesados proporcionen información adecuada para lograr una mayor eficiencia en la programación, ejecución y evaluación del manejo del agua”.

### **3.8. Evaluación de flujos (Hidrodinámica)**

Es importante mencionar lo que el desarrollo tecnológico ha logrado en el campo de la investigación, esto implica que en la actualidad existan una amplia diversidad de modelos numéricos ((Liu & Schwartz, 2011); (Adams, Chen, & Dymond, 2018); (Fleischmann et al., 2018)). En la resolución de la diversidad de problemas que se encuentran relacionados con los recursos hídricos no solamente es necesaria la representación espacial del sistema sino también la comprensión del problema (Torres-Bejarano, Padilla Coba, Rodríguez Cuevas, Ramírez León, & Cantero Rodelo, 2016). Teniendo en cuenta esto, los modelos hidrodinámicos permiten la representación de características y comportamientos de los sistemas acuáticos de interés.

---

### 3.8.1. Iber

Es una herramienta de modelación en dos dimensiones, que permite la simulación del flujo de agua poco profundas, como ríos, estuarios, canales, llanuras de inundación, todo esto tomando variables hidráulicas como caudales, velocidad, calados entre otras; solucionando según se requiera por medio de métodos numéricos con determinadas ecuaciones (Bladé et al., 2014b).

El modelo maneja los siguientes 3 módulos de cálculo, en todos los casos se emplea una malla estructurada de volúmenes finitos formada por elementos triangulares o cuadriláteros (Benayas, 2015).

- **Módulo hidrodinámico:** Considerado como la base del software, donde se da resolución a las ecuaciones de aguas poco profundas bidimensionales o ecuaciones de St. Venant 2D.
- **Módulo de turbulencia:** Permite incluir las tensiones turbulentas en el cálculo hidrodinámico.
- **Módulo de transporte de sedimentos:** Resuelve las ecuaciones de transporte (fondo y turbulento en suspensión), calculado a partir del balance de masa de sedimento la evolución de la cota de fondo.

En síntesis, Iber es un software atractivo, ya que cuenta con múltiples opciones de visualización de resultados, desde gráficos, animaciones, tablas hasta resultados por secciones en diferentes momentos de la modelación, también se pueden obtener resultados de toda clase de parámetros hidráulicos y además presenta la ventaja de ser compatible con diferentes Sistemas de Información Geográfica, pues permite exportar los resultados de cada variable en formato ráster lo que facilitara el manejo de la información y permite mejorar su representación visual.

---

### **3.8.1.1. Módulo hidrodinámico**

Este módulo de Iber hace uso de las ecuaciones de aguas poco profundas o someras, conocidas como 2D Shallow Water Equations o simplemente ecuaciones de Saint Venant y las resuelve (Bladé et al., 2014b). Dentro de estas ecuaciones bidimensionales están incluidos efectos como:

- Presión hidrostática y pendiente del fondo, fricción de fondo.
- Rozamiento superficial por viento.
- Tensiones efectivas.
- Aportes de caudal.
- Condiciones de contorno hidrodinámicas.
- Contornos abiertos.
- Condiciones de contorno internas.
- Infiltración.
- Zona de flujo preferente y zonas inundables.

## **4. Estado del arte**

La modelación hidrodinámica se ha implementado en aguas superficiales principalmente para evaluar los problemas resultantes de la afectación ambiental por contaminación. Tomando en cuenta datos de entradas y salidas, hidrodinámicos, meteorológicos e inclusive geológicos, las simulaciones que se obtienen son útiles para determinar la dinámica del medio y así establecer planes de gestión y control para garantizar la calidad del agua bien sea conservándola o restableciéndola (Barbosa Casas, 2013).

Estos modelos se encuentran disponibles unidimensional, bidimensional e incluso tridimensionalmente, y se han venido desarrollado a su vez con la modelación numérica. Debido a que en algunos fenómenos estudiados se encontró que la aplicación unidimensional no era suficiente y se alejaba demasiado de ciertas realidades y situaciones, se hace necesaria la

---

consideración de la aplicación de las dimensiones horizontales y verticales simultáneamente, dando origen entonces a la aplicación de una o dos dimensiones más. (Bladé et al., 2014a)

Como menciona (Villamizar Hernández, 2014) en su tesis *Aplicación de un modelo turbulento bidimensional para la simulación de flujo a superficie libre en un canal horizontal*, con este tipo de modelos es posible resolver todas las características hidráulicas del cuerpo de agua estudiado, tales como su profundidad, nivel de la superficie libre, rugosidad del fondo, dirección y velocidad del agua.

Dichos modelos desarrollados requieren licencias comerciales que cuentan con el desarrollo y soporte de algunas entidades internacionales, en el caso específico de Iber, que será el implementado en este caso de estudio, es actualizado periódicamente y con ello se ofrecen cursos o tutoriales de capacitación para su uso, manejo y para conocer las actualizaciones que se realizan constantemente (Bladé et al., 2014a)

#### **4.1. Modelación hidrodinámica**

Se denomina modelo al conjunto de conceptos o ecuaciones que representan una aproximación a la realidad de un fenómeno (Carvajal Villaplana, 2002). Sin embargo, en el análisis hidrodinámico existen herramientas tecnológicas que permiten la desarrollo de modelos a partir de ecuaciones definidas (e.g. (Lai, Huang, & Jiang, 2012); (Rangel Peraza, 2012)).

Según (McIntosh, Seaton, & Jeffrey, 2007), están manifestándose una gran variedad de software y de tecnologías de modelación en forma de «herramientas de soporte» que ayudan a solucionar diferentes problemas de aplicación del conocimiento científico en la investigación (e.g. (Bierkens et al., 2015); (Lee et al., 2017)). Estas tecnologías son la mejor opción para aumentar la eficiencia y rentabilidad de la investigación, además de garantizar resultados mucho más

---

precisos de carácter cuantitativo y cualitativo, disminuyendo la incertidumbre y permitiendo mejoras en el diseño, los cuales podrían evitar errores costosos, como lo menciona (Chung, 2001).

Con el gran desarrollo que han tenido los equipos de procesamiento computacional en las últimas décadas, es importante mencionar que los modelos numéricos se han convertido en una herramienta además de atractiva, muy funcional para estudiar el movimiento del agua y el transporte de sustancias como: contaminantes, nutrientes, sedimentos en suspensión y de fondo, entre otros ((Yang, Jiang, & Kong, 2010); (Musner, Bottacin-Busolin, Zaramella, & Marion, 2014)) en ambientes como ríos, lagos, embalses, estuarios y zonas costeras.

Este desarrollo ha logrado que actualmente exista una amplia diversidad de modelos numéricos ((Liu & Schwartz, 2011); (Adams et al., 2018); (Fleischmann et al., 2018)), lo que ha dificultado la manera en que un investigador, sin un conocimiento amplio o avanzado en el tema, pueda elegir alguno de ellos; el ideal para poder resolver un problema específico (Betancur Pérez, 2013), debe mencionarse que no solo es la gran oferta que existe la que interfiere en la selección, sino que además existen otros factores como el tiempo requerido por el modelo, los datos necesarios para su calibración, validación y correcto análisis, sin mencionar el costo del software (cuando este es de pago) entre otros, los que dificultan que sea una elección sencilla y directa.

Teniendo en cuenta lo anterior, dependiendo si el objetivo de la investigación puede ser tratado como un problema en una, dos o tres dimensiones se entra a definir qué tipo de modelo puede ser más adecuado (Ochoa García et al., 2014), por ejemplo, como menciona (Betancur Pérez, 2013) quien realiza una comparación entre modelos, si se busca analizar la evolución y comportamiento del fondo de un embalse, un modelo unidimensional sería suficiente para evaluar la situación (e.g. (TONIOLO, 2009)). Por otro lado, si se

---

quiere estudiar la evolución lateral en las márgenes de un río, un modelo bidimensional sería ideal, ya que cumpliría con las condiciones para resolver el problema (e.g. (Ceballos L., 2011); (Bladé et al., 2012)). O, si lo que se quiere es realizar el estudio en la variación espacio-temporal de la temperatura del agua en un embalse, un análisis tridimensional sería más adecuado, ya que permitiría tener en cuenta tanto la entrada y salida de caudales del sistema como el comportamiento que presenta frente a situaciones extremas (e.g. (Román Botero, 2011); (Betancur Pérez, 2013)).

El uso de modelos numéricos para analizar el comportamiento de los flujos hidrodinámicos ((Bladé et al., 2012); (Lai et al., 2012)) aporta información acerca de variables como los cambios que presentan los caudales, la lámina de agua, la cantidad y la concentración de contaminantes (Murillo, Brufau, & García-Navarro, 2008) para diferentes tipos de flujos, como estacionarios o no estacionarios (e.g. (Ramos-Fuertes, Marti-Cardona, Bladé, & Dolz, 2013); (Musner et al., 2014)), donde mencionan la modelación en dos dimensiones de hidrodinámica de cuerpos lenticos, en donde tienen en cuenta diferentes características de estos, como la topografía, la acción de arrastre del viento o el cambio de estación.

Teniendo en cuenta lo anterior, la elección de un modelo depende, en cada caso, del objetivo que se persigue, de la complejidad del problema y de la calidad de los datos disponibles para su validación y aplicación, además de los resultados esperados, como por ejemplo en el caso de (Salvia et al., 2009), donde se presenta una metodología para estimar el coeficiente de arrastre a partir de una combinación de imágenes SAR, modelos de interacción y datos auxiliares, debido a un incendio severo ocurrido a principios de 2008 en el Delta del río Paraná en Argentina, donde se quemó aproximadamente el 10% de la vegetación herbácea. Los autores se enfocaron en la incapacidad para monitorear los coeficientes de arrastre de humedales a escala regional, y que esto se basa en la dificultad para determinar la estructura de la vegetación a

---

partir de datos de detección remota. Basado en el hecho de que el coeficiente de retrodispersión (Loaiza, 2017) es sensible a la estructura de la vegetación de los pantanos.

Así mismo es relevante mencionar, el caso de (Munguía Balvaner, Blanco Piñón, & Alavez-Ramírez, 2016), donde debido a la falta de información sobre la hidrodinámica del comportamiento del agua en los humedales artificiales ((Chazarenc et al., 2003); (Sharley, Sharp, Marshall, Jeppe, & Pettigrove, 2017)), se realiza el análisis de tres localidades y posteriormente se complementa con una comparación de la forma que tienen los humedales artificiales en diferentes épocas y partes del mundo; lográndose determinar que la geometría de éstas es en forma de reja de canales.

## **4.2. Aplicación modelos hidrodinámicos**

En los artículos mencionados anteriormente, destacan que la implementación de un software 2D en la simulación de humedales tiene como ventaja, la representación de flujos de agua, el bajo costo y resultados más acertados. Del mismo modo, es realmente interesante la cantidad de aplicaciones que pueden realizarse con estas herramientas (e.g. (Fleischmann, Paiva, & Collischonn, 2019); (Siqueira et al., 2018)) logrando un amplio análisis de resultados.

En Barranquilla, (Torres-Bejarano et al., 2016) en la Modelación Hidrodinámica para la Gestión Hídrica del Embalse del Guájaro señala en su metodología que para la adecuada configuración y la implementación del modelo implementado en su estudio (EFDC Explore) se requiere que todos los datos evaluados por los equipos de medición y muestreo deben ser procesados y digitalizados en archivos .shp y representados en mapas temáticos, de acuerdo con la proyección Sistema Geodésico Mundial (WGS) 1984N. Además de un conjunto de datos para especificar las condiciones de contorno o de entrada al

---

modelo y así poder realizar las correspondientes simulaciones con la implementación de validar el modelo para la zona de estudio, estos datos eran:

- Velocidades de agua: para este modelo se tomaron mediciones de la magnitud y la dirección de las corrientes, así como de las profundidades en toda la superficie del cuerpo hídrico.
- Batimetría y niveles: se tomaron mediciones para la época de secas, y para la época de lluvias.
- Condiciones atmosférica: se utiliza en condiciones y forzantes atmosféricos en el modelo registros diarios de la temperatura del aire, la humedad relativa, las precipitaciones, la evaporación, la velocidad del viento y la radiación solar. Para estimar los efectos del viento sobre la superficie libre, las magnitudes y la dirección, se tomaron los datos registrados por la estación meteorológica del IDEAM situada en la zona de estudio (Torres-Bejarano et al., 2016).

Teniendo en cuenta lo anterior, estos datos son importantes no solo para ese modelo en específico, sino también para una gran variedad de modelos hidrodinámicos, además de otros datos, dependiendo del tipo de análisis y resultados que se espera obtener, por ejemplo: (García Rodríguez & Ruíz Gomez, 2018) utiliza una metodología similar a la mencionada anteriormente sin embargo para el software IBER, y además de la modelación hidrodinámica realiza una modelación de la calidad del agua, es decir que aparte de los datos de las condiciones de contorno o de entrada al modelo mencionadas antes, fue necesario tomar y analizar muestras de agua para obtener parámetros como Demanda Biológica de Oxígeno (DBO5), Demanda Química de Oxígeno (DQO), Oxígeno Disuelto (OD), Sólidos Suspendidos Totales (SST), entre otros.

#### **4.2.1. Inundaciones**

Por otro lado, para la humanidad, los desastres que tienen relación con el agua son sin duda, los eventos más frecuentes de las catástrofes naturales y

---

han originado con el pasar de los años grandes problemas. Si bien es cierto, no se puede pronosticar con exactitud cuándo va a ocurrir una inundación, pero sí es posible tener mecanismos que permitan estar preparadas a las poblaciones que pueden verse afectadas cuando estas sucedan (Toimil, Losada, & Camus, 2016).

Teniendo en cuenta lo anterior, (Juan Pablo Rodríguez-Rincón, Pedrozo-Acuña, Domínguez, & González-Villareal, 2014) mencionan que las inundaciones son el peligro natural más común y perjudicial que enfrenta la civilización, y es probable que las amenazas de inundaciones aumenten debido a las predicciones actuales del cambio climático, que además sugieren huracanes y precipitaciones más intensas. Para este tipo de eventos la metodología se puede componer de la obtención de mediciones en campo, datos de elevación, un modelo hidrológico distribuido y un modelo numérico bidimensional estándar (e.g. (J.P. Rodríguez-Rincón, Pedrozo-Acuña, Arganis-Juárez, Domínguez-Mora, & González Villareal, 2015)).

Como se ha dicho antes, el uso de modelos suele ser bastante útil, en este caso para la identificación de zonas potenciales de inundación. Por ejemplo (Caro-Camargo & Bayona-Romero, 2018) en donde realizaron un modelo hidrológico e hidráulico de dos ríos importantes que pasan por la ciudad de Tunja, implementaron el uso de diferentes software como HEC-HSM y ArcGis para el cálculo de las pérdidas de precipitación, la generación de escorrentía y la propagación de los flujos, e Iber, donde se implementaron los cálculos hidráulicos para un periodo de retorno crítico correspondiente a 100 años.

Y se obtuvieron como resultado mapas de máxima peligrosidad en zona de estudio, identificándose puntos de interés (zonas susceptibles de desbordamiento de los ríos Jordán y la Vega) generando los perfiles transversales de cauce, posteriormente se analizó el impacto y afectación en las zonas aledañas, proponiendo algunas alternativas de corrección, prevención y

---

mitigación de impactos. Con el paso de los años, este tema ha mostrado un gran interés por diferentes investigadores, por mencionar algunos casos se encuentran los siguientes: ((Espinosa Villalpando, 2012); (Dumanski, Pomeroy, & Westbrook, 2015); (Wurl, Martínez García, & Imaz Lamadrid, 2014); (DeVries et al., 2020); (Kastridis & Stathis, 2020); (Juan Pablo Rodríguez-Rincón et al., 2014)).

#### **4.2.2. Hidrodinámica en humedales**

El deterioro en la calidad de agua y además, la pérdida de potencial como fuente de abastecimiento de agua para diversas actividades humanas, puede ser causado por las aguas contaminadas con o sin tratamiento a las que los cuerpos de agua naturales o artificiales suelen estar sometidos (Luna Pabello & Aburto Castañeda, 2013).

En su tesis, (Aburto Castañeda, 2011) afirma que los humedales artificiales son sistemas empleados para la depuración de aguas residuales domésticas, así como para cierto tipo de aguas de origen industrial, su aplicación se ha enfocado en brindar tratamiento a las aguas contaminadas, vertidas por comunidades pequeñas y medianas (menores a 5 mil habitantes), que no poseen suficientes recursos para desarrollar tecnologías costosas. El uso de estos humedales resulta una opción altamente viable debido principalmente al bajo costo de su implementación y a la facilidad de construcción y operación que ofrecen ((Sharley et al., 2017); (Munguía Balvaner et al., 2016)).

Teniendo en cuenta lo anterior, en Francia, (Chazarenc et al., 2003) menciona que en los últimos años el uso de humedales construidos para el tratamiento de aguas residuales rurales ha aumentado, señalan que los niveles de eliminación de contaminantes se deben a una buena gestión y combinación de procesos químicos, biológicos y físicos, también mencionan el importante papel que juegan las plantas acuáticas en los humedales artificiales. Señalan que uno de los mejores métodos para determinar y analizar las rutas de flujo de

---

humedales construidos es utilizar la evaluación de la distribución del tiempo de residencia hidráulica (TRH) mediante el método de trazado de impulsos, generalmente utilizado en procesos de ingeniería química.

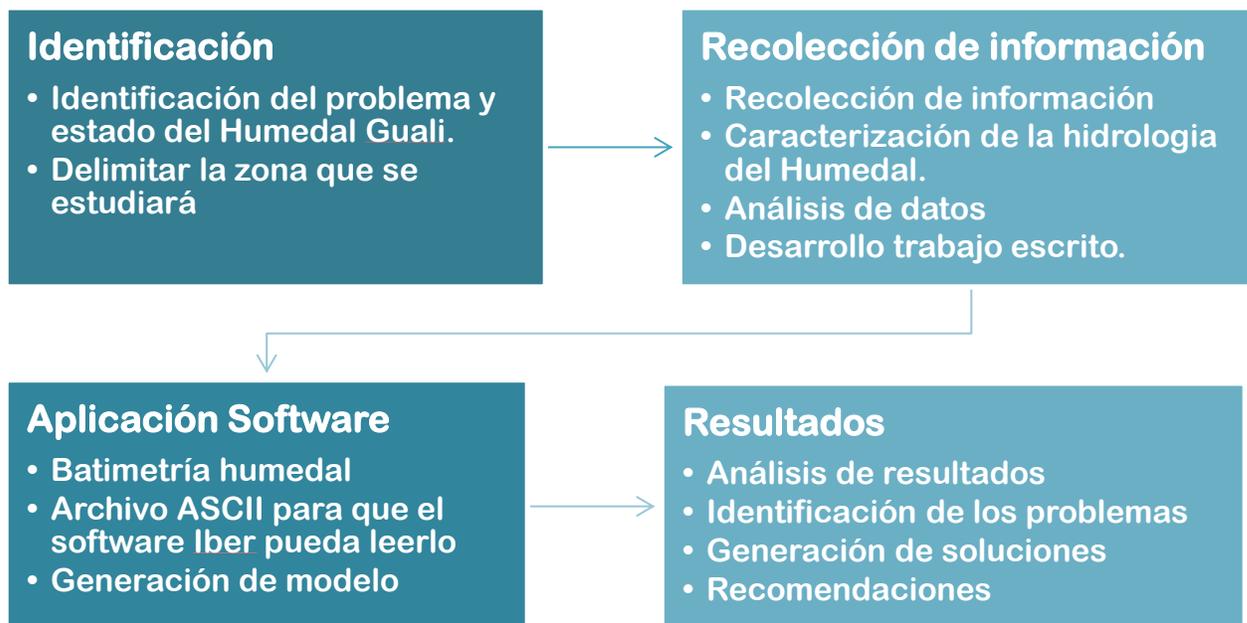
Concluyen que la presencia de plantas parece mejorar el flujo al crear una conexión entre la superficie y la rizosfera (zona de interacción entre las raíces de las plantas y los microorganismos del suelo). El crecimiento de las plantas puede permitir un mejor contacto entre el efluente y la zona de raíces, la influencia de factores abióticos como la precipitación tiene una influencia directa en el rendimiento del tratamiento (Chazarenc et al., 2003).

Por otro lado, como se sabe las funciones de los humedales pueden verse fácilmente afectadas en áreas de fuerte desarrollo humano, además de la falta de interés y desinformación que existe acerca de estos cuerpos hídricos ((Riddell et al., 2013); (Rosenberry & Hayashi, 2013)). Por lo tanto, los humedales parecen funcionar mejor en zonas alejadas de grandes poblaciones, además, el valor depende en parte de dónde se encuentran en el paisaje, por ejemplo, el grado en que un humedal está abierto a flujos hidrológicos y biológicos con otros sistemas, incluidos los paisajes agrícolas. (William J Mitsch & Gosselink, 2000) hablan del comportamiento de los humedales según dónde se encuentren ubicados y lo que los rodee, y concluyen que en un entorno hidrogeomórfico, los humedales fluviales y ribereños tienen una mayor probabilidad de tener valores altos que los humedales de cuencas aisladas.

---

## 5. Metodología

Para la realización de este proyecto de grado se desarrolló una metodología dividida en cuatro fases, explicadas a continuación:



*Diagrama 1. Fases de la metodología para el desarrollo del trabajo de grado. Fuente propia.*

### 5.1. Identificación

#### 5.1.1. Identificación del problema

El humedal Gualí Tres Esquinas y Lagunas del Funzhé, se encuentra sobre los municipios de Funza, Tenjo y Mosquera, con un área aproximada de 1.196 hectáreas donde, dentro del municipio de Funza se cuenta con un área aproximadamente de 1069,11 hectáreas es decir el 89.28%; Mosquera, por su parte, posee 93.98 hectáreas que corresponden a un 7.86%; mientras que el municipio de Tenjo tiene un área correspondiente de 34.3 hectáreas aproximadamente, lo que corresponde al 2.87% (Vasco & Sanchez, 2017).

Además de ser un espacio para el resguardo de cientos de especie y una fuente importante de agua para el sector agropecuario de los municipios

---

aledaños (Hena Sarmiento, 2004), también es empleado como receptor de aguas residuales de dichos municipios, sobrepasando la capacidad resiliente del sistema, y a su vez, ha sido durante algunas épocas, fuente de abastecimiento para consumo humano, esto ha ocasionado que actualmente el humedal se encuentre en una situación dramática debido a problemas como el relleno de ciertas áreas, el avance de los potreros sobre el espejo de agua disminuyendo el mismo, y la contaminación por vertimientos domésticos e industriales, entre otros.



*Figura 11. Estado del humedal Guali. Fuente:(Coratierras, 2017)*

Hace unos años el humedal tenía forma de cuernos de venado, este se alimentaba por la corriente principal conocida como la quebrada del Porte, que nacía en el cerro de las Palmas en Tenjo, en el punto conocido como el Cerrito, la cual prácticamente hoy ha desaparecido. Actualmente, ha sido desecado en varios sectores, aislándolo en diversas ciénagas, algunas prácticamente eliminadas en su totalidad (CAR, 2016).

### **5.1.2. Delimitación zona de estudio**

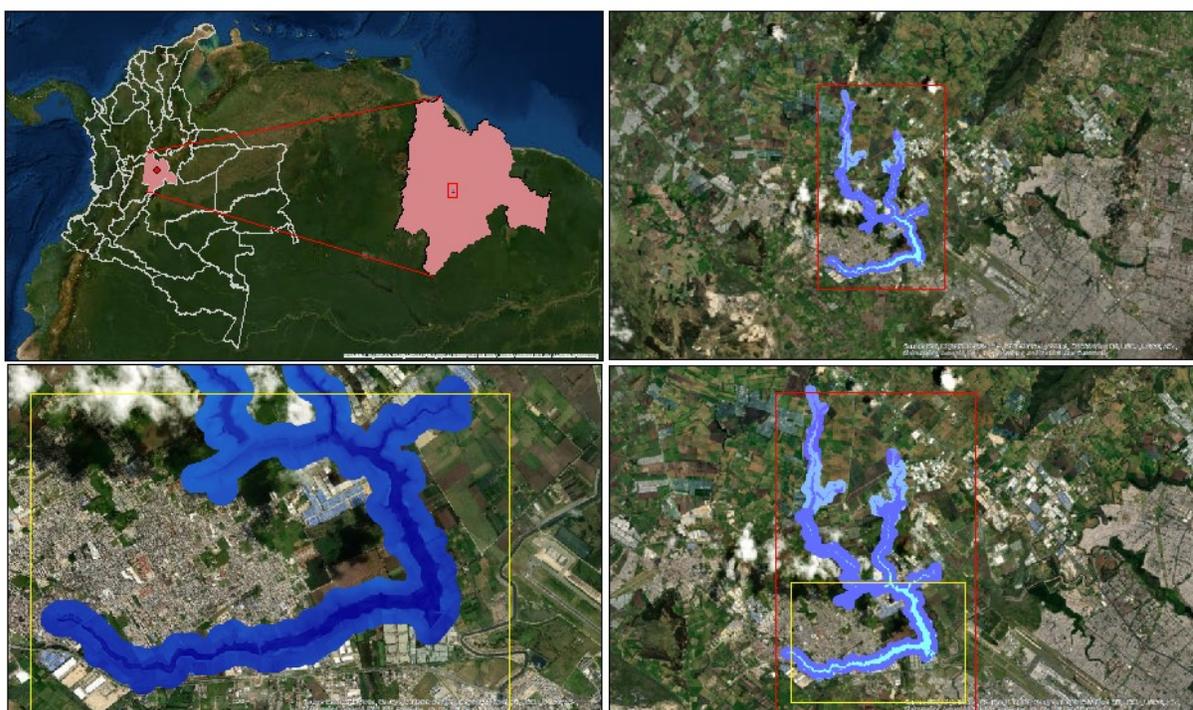
Se elige como zona de estudio la parte sur del humedal, que comprende el cuerpo principal del humedal, en el costado norte hasta las cercanías del río Bogotá (4°42'21.44" N – 74°10'44.45" O) Es de forma triangular y uno de sus brazos se ubica en el municipio de Mosquera (4°42'18.59" N – 74°13'34.36" O) (CAR, 2018).

Las coordenadas de ubicación de la zona de estudio se pueden ver a continuación.

	Norte	Sur	Este	Oeste
<b>X</b>	987671,618	988530,457	988244,707	986244,453
<b>Y</b>	1014553,52	1011927,32	1013972,02	1011635,22

*Tabla 2. Coordenadas zona de estudio.*

Se elige esta parte del cuerpo de agua, debido a que, como se dijo anteriormente y se puede ver en la Figura 12, comprende el cuerpo principal del humedal, ya que es la zona con mayores profundidades y la que menos afectada se ha visto por rellenos, este sector recibe múltiples canales de aguas lluvias con conexiones erradas, junto con las aguas tratadas de la planta de tratamiento del municipio de Funza, además de ser elemento fundamental del Distrito de Riego La Ramada y ser alimentado por el canal Chicú, su cuenca aferente presenta un área de 16,097 km<sup>2</sup>.



*Figura 12. Zona de estudio en amarillo. Fuente propia*

---

## 5.2. Recolección de información

Para la realización de este trabajo de grado se consultaron y utilizaron, diversos estudios en los temas físicos, topográficos, hidrológicos y de manejo de recurso hídrico como Planes de Manejo vigentes, artículos relacionados con todo lo referente a la hidrodinámica en humedales, además de estudios elaborados por diferentes entidades, normatividad y lineamientos tanto del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia IDEAM, y principalmente de la Corporación Autónoma Regional, entre otros.

### 5.2.1. Batimetría

La Corporación Autónoma Regional (CAR, 2016) proporcionó el listado de coordenadas de detalles batimétricos del humedal, el cual estará anexo a este documento (anexo a.), y un ortomosaico de alta resolución. La CAR realizó secciones batimétricas mediante equipo convencional GPS en método RTK, se tomaron secciones de 50 metros, con el fin de generar una mejor resolución del fondo. En la Figura 13 se puede observar el mapa topo-batimétrico de la zona, donde se puede resaltar la profundidad media del humedal de aproximadamente 2542 m.s.n.m. como se ve en la mayor parte de la zona sur, además se identifican las alturas del terreno desde los 2570 m.s.n.m. hasta los 2544 m.s.n.m.

### 5.2.2. Climatología

Para la descripción climática de la zona de estudio se eligieron las estaciones que se encuentran dentro y en zonas cercanas a la zona de estudio.

Estación	Código	Tipo	Coordenadas		Elevación m.s.n.m.	Corriente	Municipio
			X (Este)	Y (Norte)			
La Ramada	21205160	CP	988367	1013359	2545	Bogotá	Funza
Apto. El Dorado	21205790	SP	991957	1011479	2547	Bogotá	Bogotá

CP: Climatología principal. SP: Sinóptica principal.

Tabla 3. Estaciones climatológicas utilizadas. Fuente: (CAR, 2016)

En la Tabla 3 se presentan las estaciones climatológicas identificadas, indicando el código de la estación, la categoría, las coordenadas geográficas, la elevación, la cuenca y el municipio donde se encuentran (Figura 13).

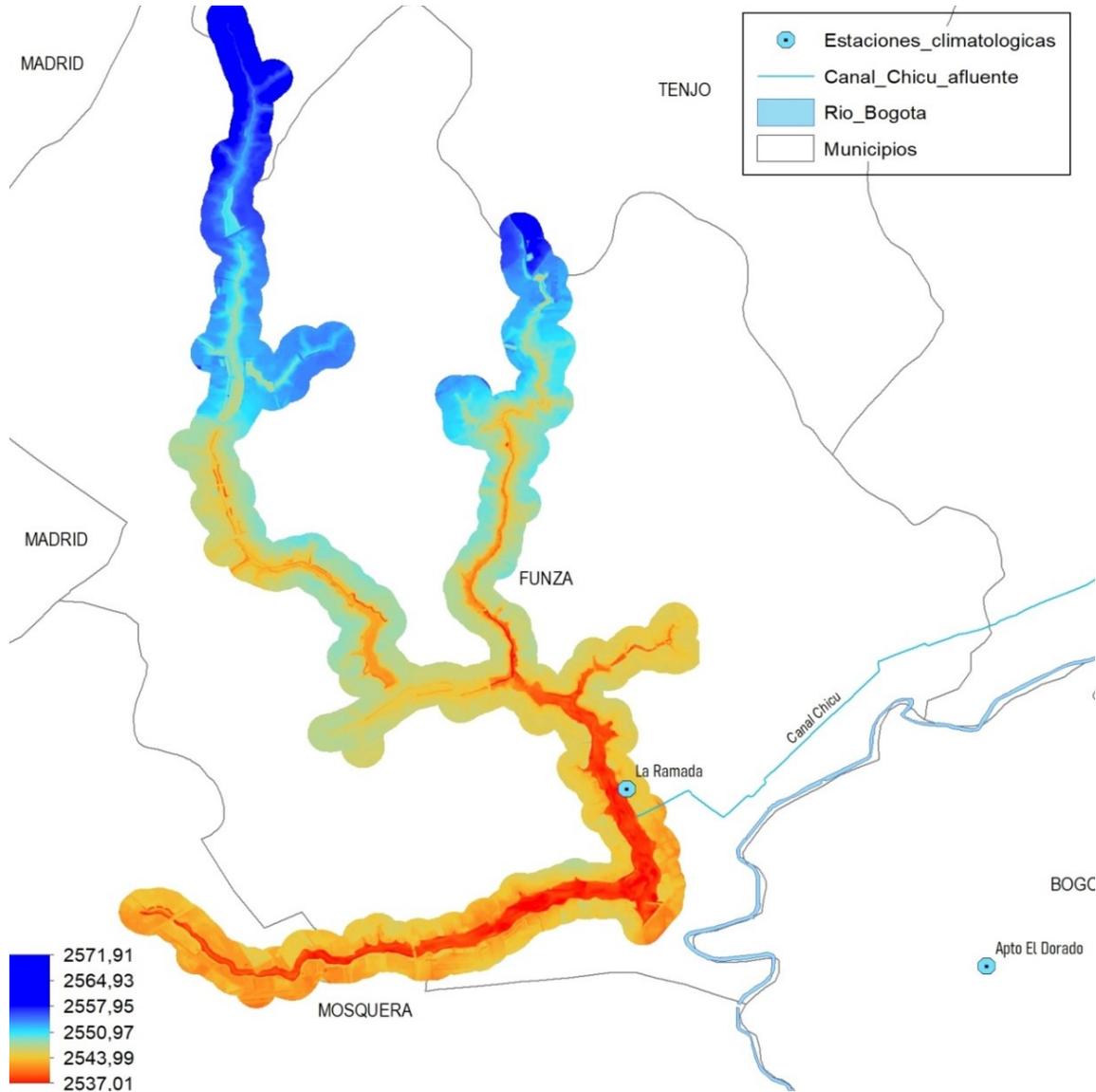


Figura 13. Ubicación estaciones climatológicas. Fuente propia

La red climatológica se compone de estaciones que realizan observaciones de temperatura, viento, humedad relativa, precipitación, evaporación y radiación, durante períodos largos para conocer la distribución más común y las características más frecuentes.

De las anteriores estaciones, se seleccionó la estación climatológica principal La Ramada al ser la más cercana al cuerpo hídrico para la descripción pluviométrica y de parámetros climatológicos del área.

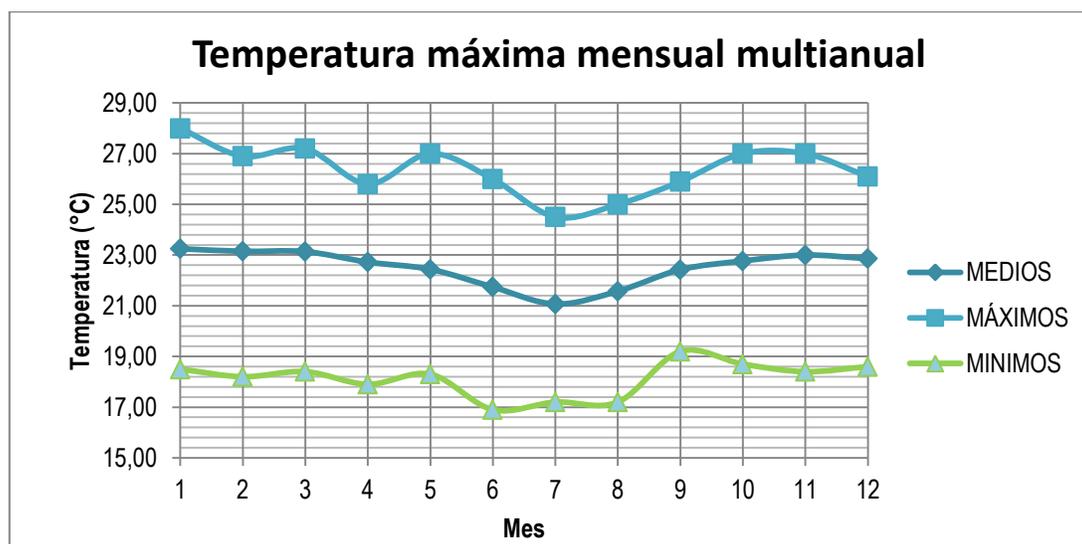
### 5.2.3. Temperatura

La temperatura ambiental hace referencia al estado térmico de la atmosfera o masa de aire de un ambiente dado, es el resultado del intercambio del calor por conducción y radiación de las fuentes a la atmosfera (Escuela Colombiana de Ingeniería, 2008). La medida de la temperatura se hace posible debido a la transferencia de calor entre cuerpos de niveles distintos de energía cinética molecular media. Esta variable se determina como una magnitud física, que caracteriza el movimiento aleatorio medio y presenta una variabilidad en función de la elevación (IDEAM, 2007).

Realizando un análisis temporal, el comportamiento de la temperatura se obtuvo mediante la información de la serie de la Estación La Ramada cuyos registros superan los 20 años. (Ver anexo b.)

#### 5.2.3.1. Temperatura máxima (°C)

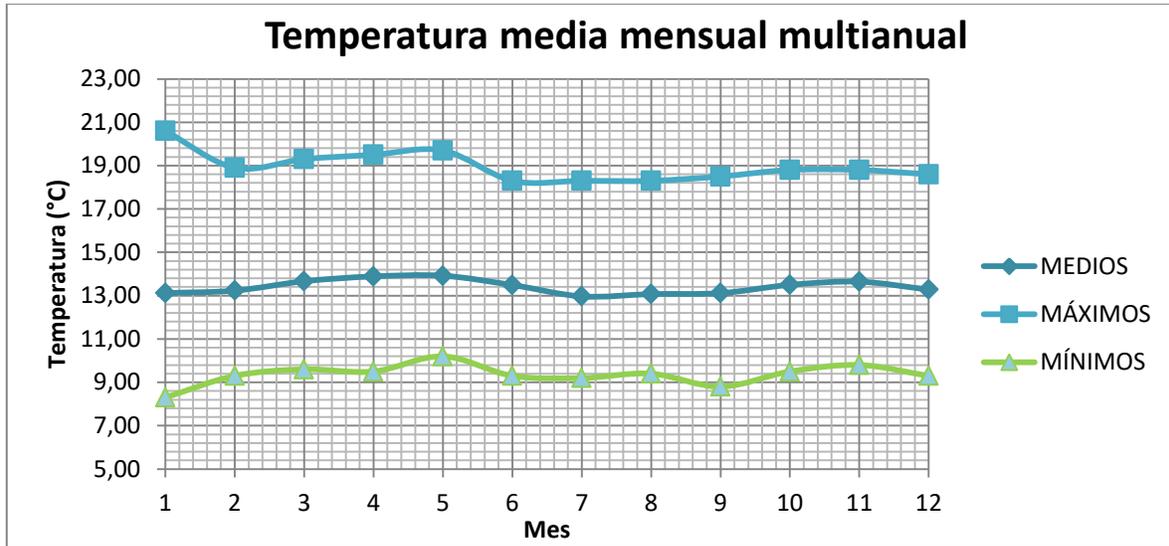
La temperatura máxima registrada es de 28 °C, la cual se presentó en enero de 2006.



Gráfica 1. Temperatura máxima mensual. Fuente: (CAR, 2019)

### 5.2.3.2. Temperatura media mensual (°C)

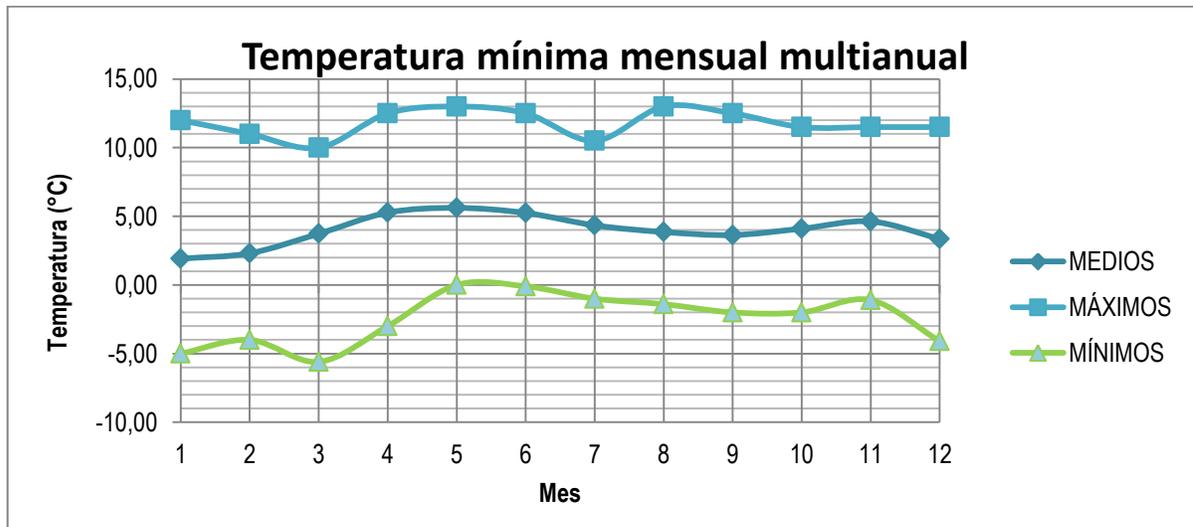
Teniendo en cuenta la información brindada por la estación de La Ramada, la temperatura media registrada de la zona fue de 13,41 °C.



Gráfica 2. Temperatura media mensual. Fuente: (CAR, 2019)

### 5.2.3.3. Temperatura mínima mensual (°C)

Como se puede ver en la gráfica 3. La temperatura mínima registrada en esta área corresponde a  $-5,6$  °C, la cual se presentó en marzo de 1964.



Gráfica 3. Temperatura mínima mensual. Fuente: (CAR, 2019)

---

## **5.2.4. Hidrología**

### **5.2.4.1. Estudio hidrológico**

Como se mencionó antes, mucha de la información utilizada fue brindada por la Corporación Autónoma Regional, la cual realizó un análisis de frecuencia de lluvias máximas en 24 horas por medio del modelo lluvia – caudal del soil conservation service S.C.S. (Sánchez San Román, 2015), utilizando el valor de precipitación máxima diaria utilizando los periodos de retorno 10, 15, 20, 50 y 100 años.

La determinación de las crecientes con diferentes periodos de retorno fue calculada por medio del programa HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center – Hydrologic Modeling System) (López et al., 2012). Los hidrogramas de las crecientes en la cuenca se elaboraron con el modelo lluvia caudal con en el método del S.C.S. con el fin de determinar la esorrentía producida por un aguacero.

### **5.2.4.2. Estimación de la oferta total y disponible**

También se encontró información acerca del balance hídrico, para realizar este y establecer la oferta hídrica de la cuenca la CAR tuvo en cuenta los caudales que entran y salen del humedal (caudal de la PTAR de Funza, canal chicú, entre otros), así como las variaciones del volumen almacenado dentro del sistema, en el caso que se pueda presentar reboce en las estructuras (CAR, 2016). Esto se realizó en los diferentes sectores del humedal, pero la zona de interés se muestra en la Tabla 4.

Para el cálculo de los caudales medios de entrada se utilizaron los registros diarios de precipitación y mediante una relación de precipitación caudal – se establecieron los caudales diarios que la cuenca aporta al humedal y de esta manera obtener el caudal medio mensual o anual. Los caudales medios de salida se estimaron a partir de los cálculos de ETP según los resultados del estudio elaborado por el IDEAM.

Mes	Precipitación Humedal (mm)	Precipitación Cuenca (mm)	Evapotrans. Potencial (mm)	ETR (Budyco) (mm)	Área Espejo (m <sup>2</sup> )	Caudal medio Canal Chicú (m <sup>3</sup> /m)	Caudal PTAR (l/s)
Ene	21,2	0,00	76,28	20,64	1.474.945	3,2	90
Feb	70,1	0,00	71,18	49,02	1.485.064	3,2	90
Mar	103,7	0,00	78,25	61,09	1.496.130	3,2	90
Abr	167,2	10,3	72,44	64,61	1.553.637	3,2	90
May	124,5	0,32	72,55	61,15	1.702.045	3,2	90
Jun	51,1	0,00	70,02	40,78	1.845.817	3,2	90
Jul	39,4	0,00	74,46	34,74	1.982.721	3,2	90
Ago	26,4	0,00	76,92	25,19	2.071.888	3,2	90
Sep	64,2	0,00	74,19	47,76	2.115.255	3,2	90
Oct	161,3	1,56	72,1	64,01	2.172.174	3,2	90
Nov	132,9	0,00	78,71	66,08	2.244.004	3,2	90
Dic	75,6	1,04	71,36	50,88	2.306.931	3,2	90

Mes	Consumo por riego (m <sup>3</sup> )	Vol. por precipitación (m <sup>3</sup> )	Vol. Canal Chicú (m <sup>3</sup> )	Vol. PTAR (m <sup>3</sup> )	Vol. por Evaporación Real (m <sup>3</sup> )	Vol Mensual (m <sup>3</sup> )	Nivel Promedio (msnm)	Caudal (l/s)
Ene	3.856.780	31.269	3.749.760	241.056	30.450,20	134.855	2.541,82	50,35
Feb	5.895.596	104.103	5.677.056	217.728	72.798,90	30.493	2.541,87	12,6
Mar	3.390.451	155.149	3.214.080	241.056	91.396,80	128.437	2.541,93	47,95
Abr	3.229.097	504.710	3.110.400	233.280	100.384,80	518.908	2.542,05	200,2
May	3.415.194	219.364	3.392.640	241.056	104.077,10	333.789	2.542,28	124,62
Jun	2.775.572	94.321	2.626.560	233.280	75.266,20	103.323	2.542,46	39,86
Jul	1.896.945	78.119	1.785.600	241.056	68.888,20	138.942	2.542,55	51,87
Ago	2.232.213	54.698	2.142.720	241.056	52.186,10	154.074	2.542,61	57,52
Sep	2.156.904	135.799	2.073.600	233.280	101.024,00	184.752	2.542,69	71,28
Oct	1.951.773	386.532	1.785.600	241.056	139.039,00	322.377	2.542,79	120,36
Nov	2.230.732	298.228	2.073.600	233.280	148.280,00	226.096	2.542,90	87,23
Dic	12.350.038	198.244	3.678.336	241.056	117.374,40	143.482	2.543,00	53,57

Tabla 4. Balance hídrico Sector Sur. Fuente: (CAR, 2016)

### 5.2.5. Descripción hidrológica

El humedal es de forma irregular, nace en cercanías a los cerros ubicados en el sector conocido como La Punta en el municipio de Tenjo y se extiende en sentido sur hasta el río Bogotá en el punto conocido como La Ramada, se encuentra a 2.535 m.s.n.m. y se ubica en la parte central de la Cordillera Oriental, en el sector occidental de la sabana de Bogotá, este cuerpo de pantanos es el más grande de Cundinamarca, perteneciente a la cuenca media del río Bogotá, tiene un vaso (o cuerpo del humedal que hace referencia a la zona acuática propiamente dicha) de un área de 288 hectáreas, en la actualidad

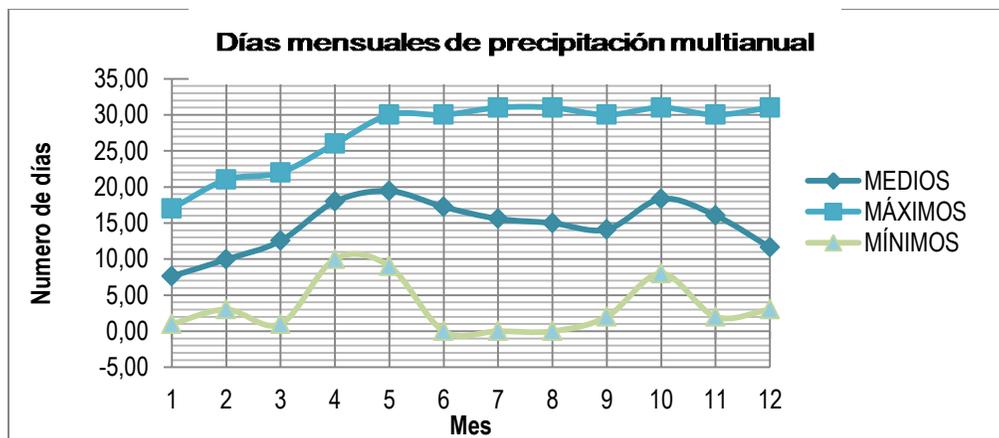
cuenta con un espejo de agua de 268 hectáreas y una zona de recuperación de 327 hectáreas.

Como se mencionó antes, se hizo uso de La estación climatológica La Ramada, identificada con el código 2120516, se localiza en las coordenadas E: 988907 y N: 1011808, al ser la más cercana. Está a cargo de la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca, CAR, y registra datos desde 1956 (ver Anexo b).

Para realizar el análisis hidrológico es necesario mencionar que el humedal Gualí es un cuerpo hídrico regulado por el canal Chicú, que se abastece con 3,2 m<sup>3</sup>/seg de agua procedentes del río Bogotá mediante la estación de bombeo elevadora denominada Chicú, en el punto de desembocadura de esta quebrada en el río Bogotá. Los niveles del humedal se controlan y operan de acuerdo con las necesidades del Sistema Hidráulico de Manejo Ambiental y Control de Inundaciones La Ramada, teniendo en cuenta esto, se tomaron los datos de precipitación, evaporación, humedad y temperatura multianual desde el año 1956 y se graficó cada uno de estos tomando sus máximos, medios y mínimos.

#### **5.2.5.1. Días mensuales de precipitación (mm)**

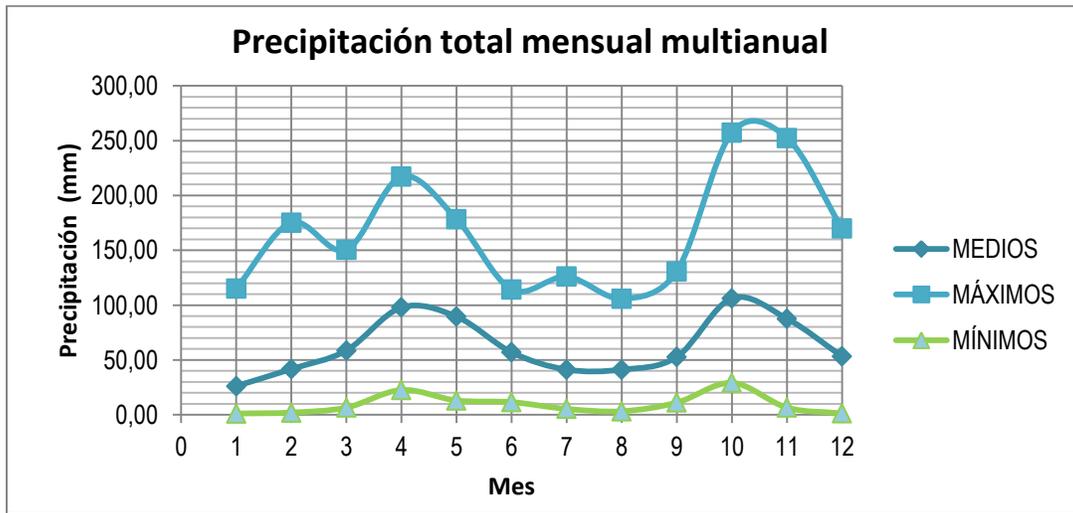
En la gráfica 4. Se puede ver que los periodos más lluviosos del año registrados corresponden a los meses de abril-mayo y octubre-noviembre, con un promedio de 15 días consecutivos de lluvia.



Gráfica 4. Días mensuales de precipitación Fuente: (CAR, 2019)

### 5.2.5.2. Precipitación total (mm)

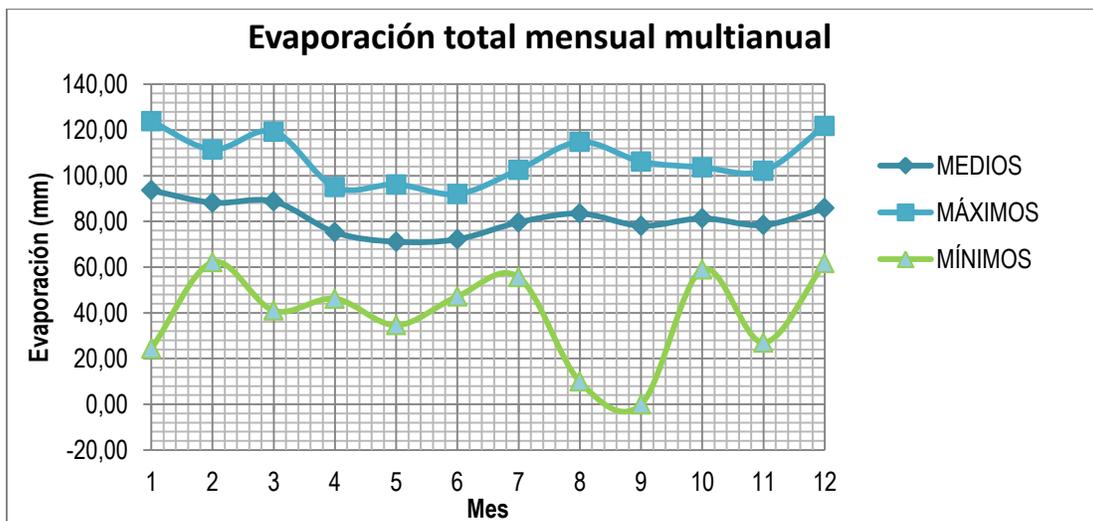
En la gráfica 5. Se puede evidenciar un régimen bimodal con una temporada seca bien marcada a principio de año, y una segunda con volúmenes de precipitación entre los 200 a 260 mm. La primera temporada corresponde a los meses enero a marzo mientras que los meses picos son abril y octubre.



Gráfica 5. Precipitación total mensual. Fuente:(CAR, 2019)

### 5.2.5.3. Evaporación total mensual (mm)

La zona de influencia del humedal presenta una evaporación total máxima de 123,8 mm que corresponde al mes de enero del mes de 1969 y una media de 81,31 mm.



Gráfica 6. Evaporación total mensual multianual. Fuente:(CAR, 2019)

### 5.3. Puesta a punto de modelo

#### 5.3.1. Modelo de Elevación Digital

A partir de la batimetría del humedal brindada por la Corporación Autónoma Regional, se generaron las curvas de nivel para poder crear un Modelo de Elevación Digital el cual se puede ver en la Figura 14a.

En la Figura 14 se puede evidenciar los diferentes profundidades que presenta el área total del humedal; como se ve en la Figura 14b y teniendo en cuenta los colores de referencia para las profundidades, en la parte norte del humedal se presentan niveles de 2550 m.s.n.m a 2571 m.s.n.m., por otro lado en la Figura 14c, la parte media del humedal presenta niveles de 2545 m.s.n.m a 2549 m.s.n.m. y en la Figura 14d, el sector sur del humedal presenta los niveles más bajos que van desde los 2536 m.s.n.m a 2544 m.s.n.m. al ser la zona del humedal más profunda, se elige como área de estudio.

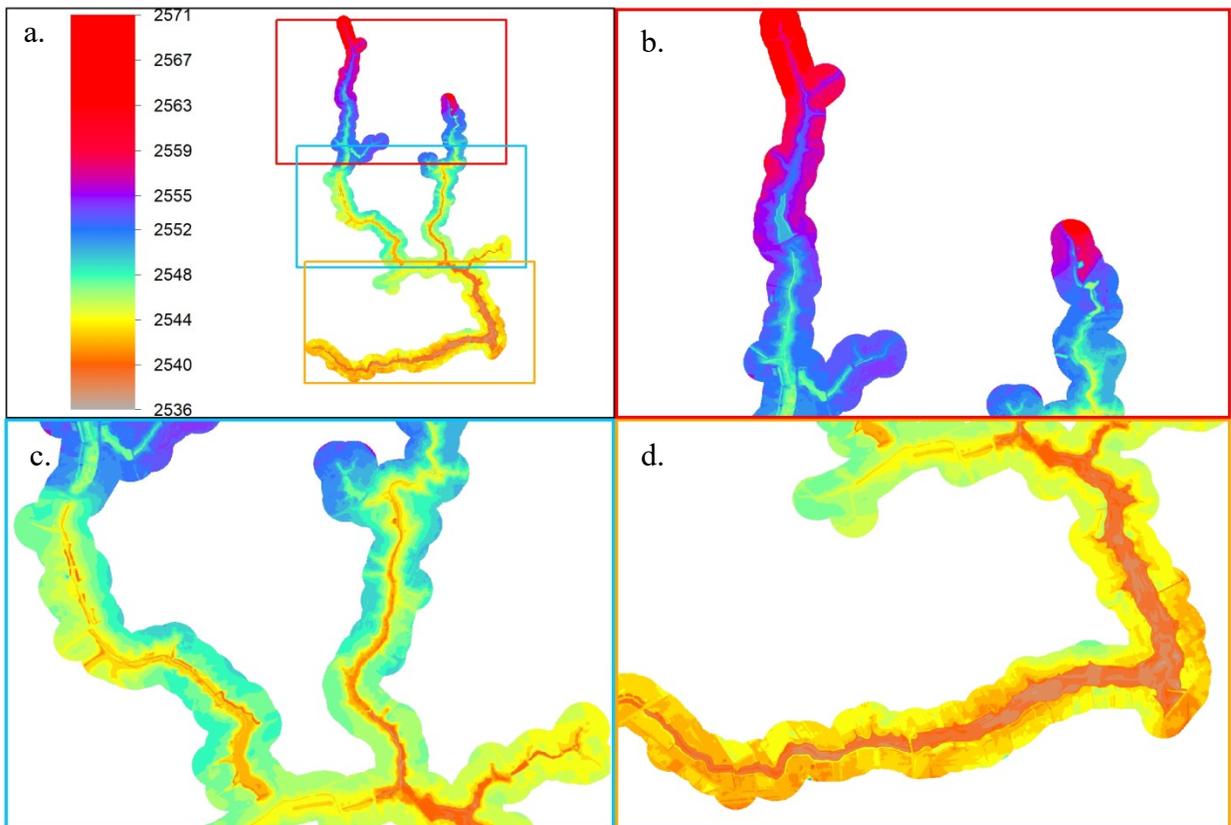


Figura 14. a. Modelo de elevación digital. b. Sector norte del humedal. c. Sector medio del humedal. d. Sector sur del humedal. Fuente: propia.

---

### 5.3.2. Generación de la malla de cálculo

La generación de la malla de cálculo se realiza posterior a la definición de la geometría de la zona, generalmente la geometría es la delimitación de espacios que permiten diferenciar entre usos de suelo, infraestructuras y otros elementos.

Al ser un cuerpo de agua, cuenta con geometrías irregulares, a partir de esto se implementa una malla de modelación no estructurada triangular, la cual permite que cada una de las zonas se les puede asignar un tamaño y criterio de mallado diferente. Es decir, que en las zonas más sensibles de detalle se asignará un tamaño de elementos más pequeños y en zonas con menos detalle, se asignarán detalles más grandes, es por esto que se asignan dimensiones de 5 metros al área húmeda y de 10 metros a la zona que rodea el humedal, como se puede ver en la Figura 15.

Es importante mencionar que cuanto más fina es la malla, los cálculos son más precisos, ya que la malla se parecerá más a la geometría real del terreno, pero el tiempo de cálculo y el tamaño de los archivos de resultados serían mucho más grandes.

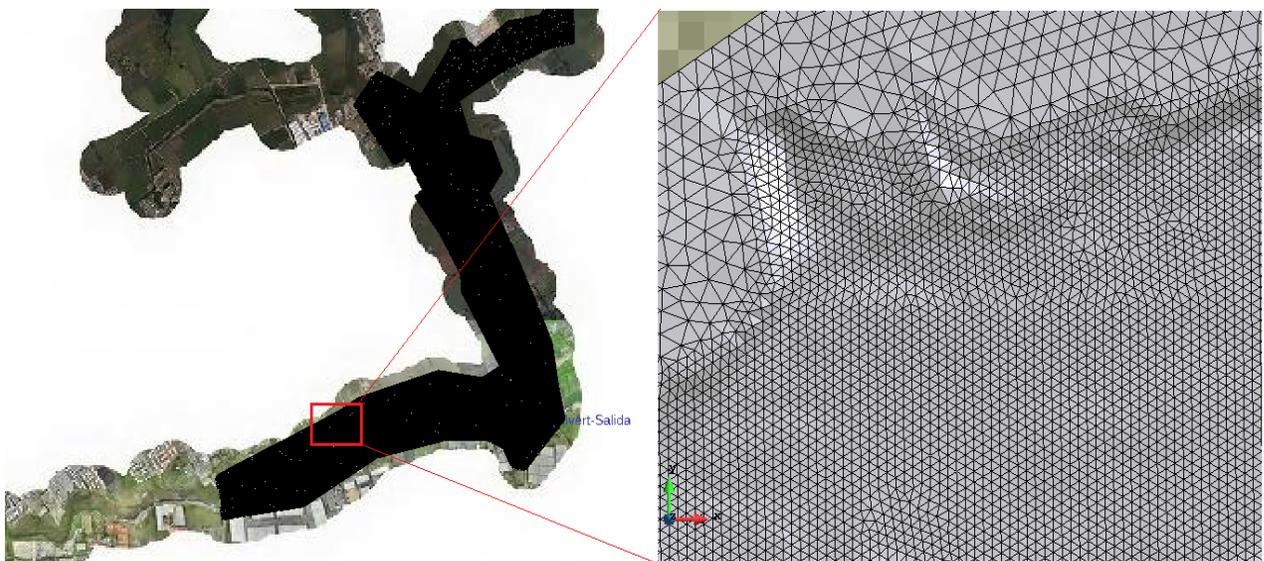


Figura 15. Malla de cálculo zona de estudio en Iber. Fuente propia.

### 5.3.3. Condiciones de contorno

En la etapa del pre-proceso se realiza la definición de la geometría y la malla de cálculo, además se deben ingresar las condiciones de contorno e iniciales, es decir entradas y salidas que tiene el humedal, los cuales son los caudales máximos correspondientes a los tránsitos para una creciente con periodos de retorno (100 años) de las diferentes zonas del humedal que tienen conexión a la zona de estudio elegida.

Además, una cota de lámina de agua igual de 2539.4 m.s.n.m. y una estructura hidráulica (Box Calvert 2x2) ubicada en el sector sur conectando con el río Bogotá, las entradas y salidas se pueden ver en la Figura 16.

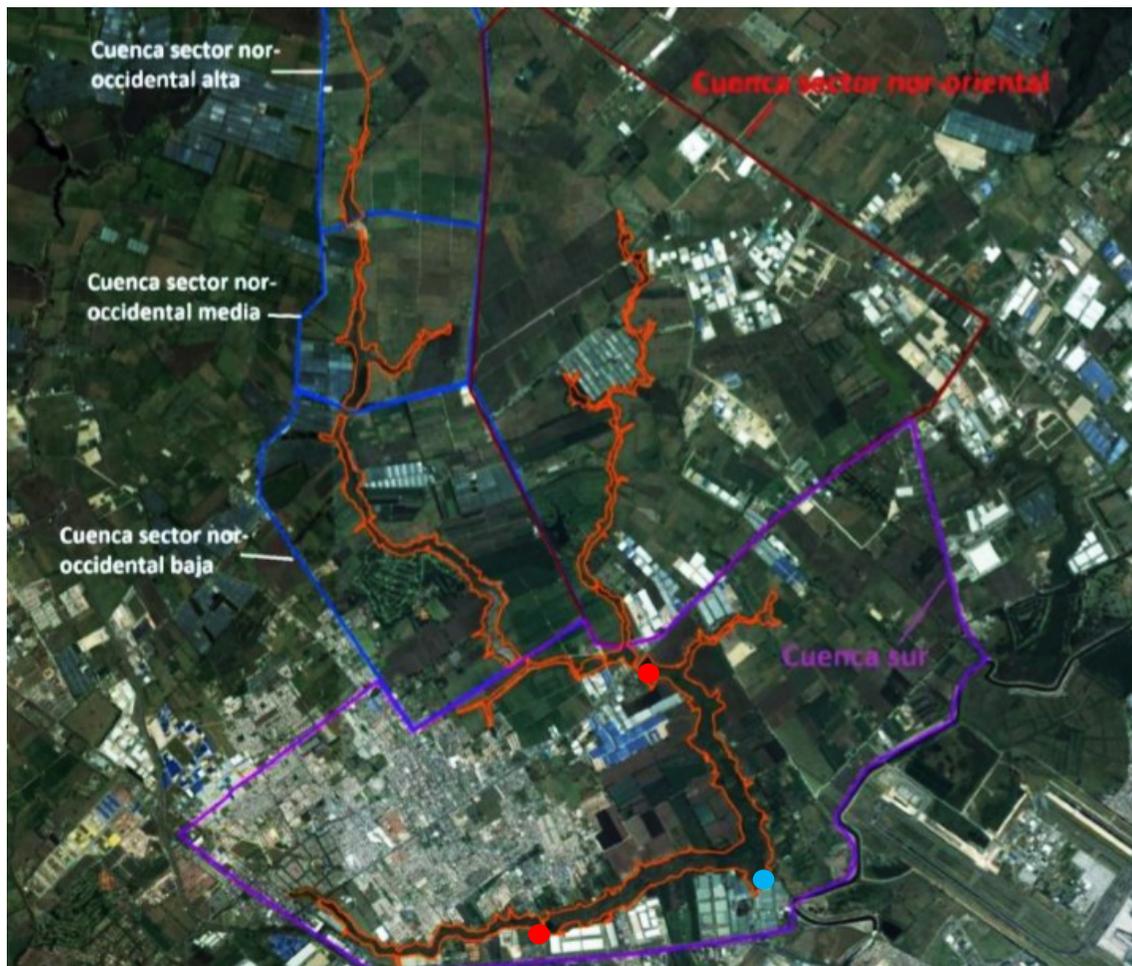
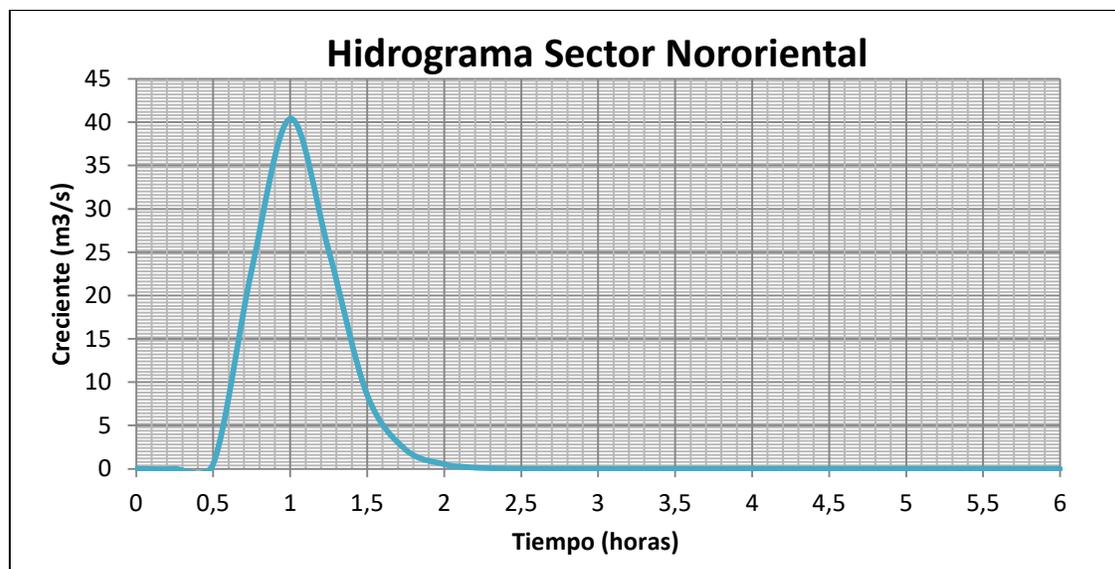
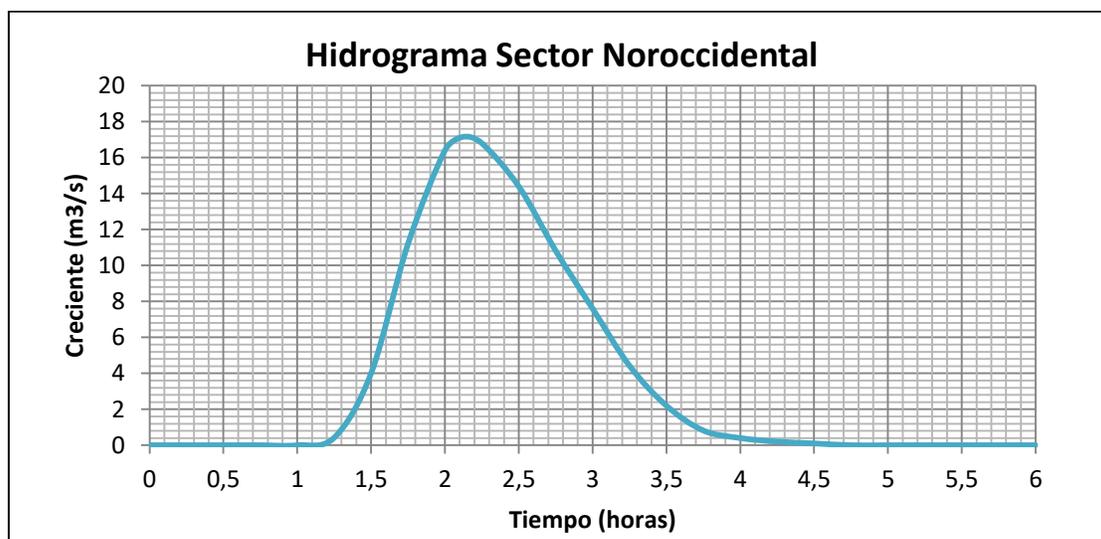


Figura 16. Identificación y ubicación cuencas del humedal, entradas (punto rojo) y salidas (punto azul) del área de estudio. Fuente propia.

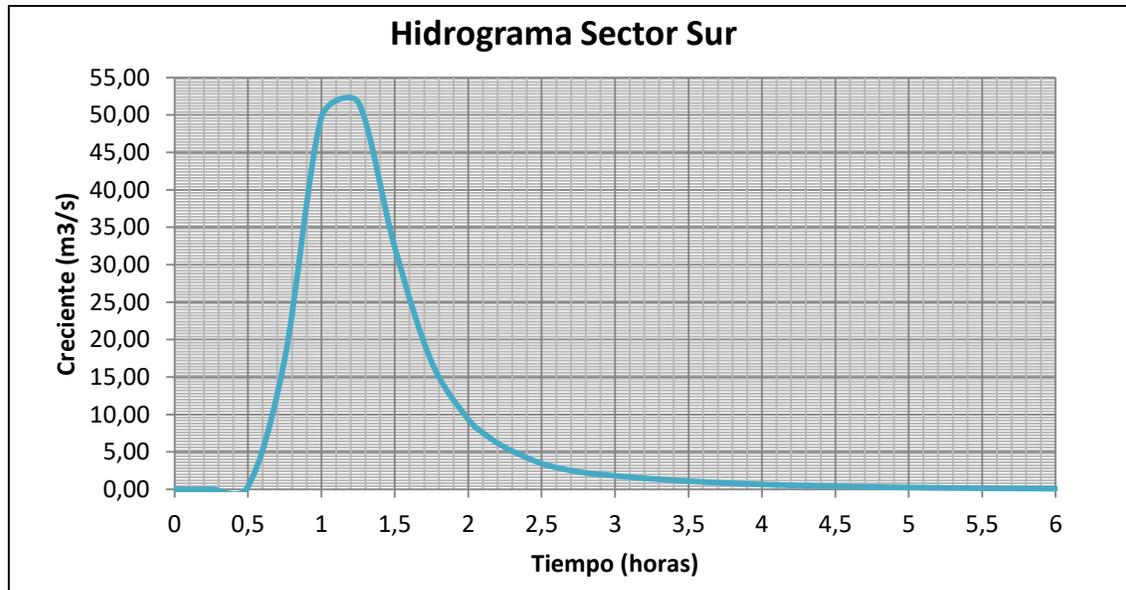
Teniendo en cuenta lo anterior y como se puede ver en la Figura 16, a la cuenca sur, zona donde se encuentra el área de estudio de interés, conecta directamente con la cuenca del sector noroccidental baja y con la cuenca nororiental, es por esto que se utilizan los hidrográmas de estas zonas junto con el del sector sur (graficas 7 a 9), como condiciones iniciales para la modelación.



Gráfica 7. Hidrograma Sector Nororiental. Información tomada del informe plan y diagnostico Gualí (CAR, 2016) Fuente propia.



Gráfica 8. Hidrograma sector noroccidental. Información tomada del informe plan y diagnostico Gualí (CAR, 2016) Fuente propia.



Gráfica 9. Hidrograma sector Sur. Información tomada del informe Plan y diagnóstico Gualí (CAR, 2016)  
Fuente propia.

Definidas las entradas, los tiempos máximos y de intervalo, posteriormente, Iber solicita especificar los datos de uso de suelo por superficies o polígonos, y con ello el mismo programa podrá determinar la rugosidad, debido a que al introducirlos Iber automáticamente asigna los valores que ya vienen predeterminados para contemplar el Coeficiente de Manning, para este caso según (Chow, 1959) se le da un valor de 0,055 que en el software se identifica como “río”.

#### 5.3.4. Proceso

En esta etapa, una vez creada la geometría, generada la malla y determinadas todas las condiciones y parámetros se procede a iniciar el cálculo. Durante este, se puede visualizar la información del proceso para detectar posibles errores.

Hasta este punto y con los datos consignados Iber podría solucionar así el modelo hidrodinámico, y los resultados se pueden ver en el post-proceso.

## 5.4. Resultados

Una vez ejecutado el modelo, en la etapa de post-proceso, que como se mencionó antes permitirá la visualización de los resultados; fueron evaluados parámetros de importancia para la hidrodinámica de este humedal, entre ellos la velocidad del flujo (m/s), el calado o tirante (m) y el número de froude.

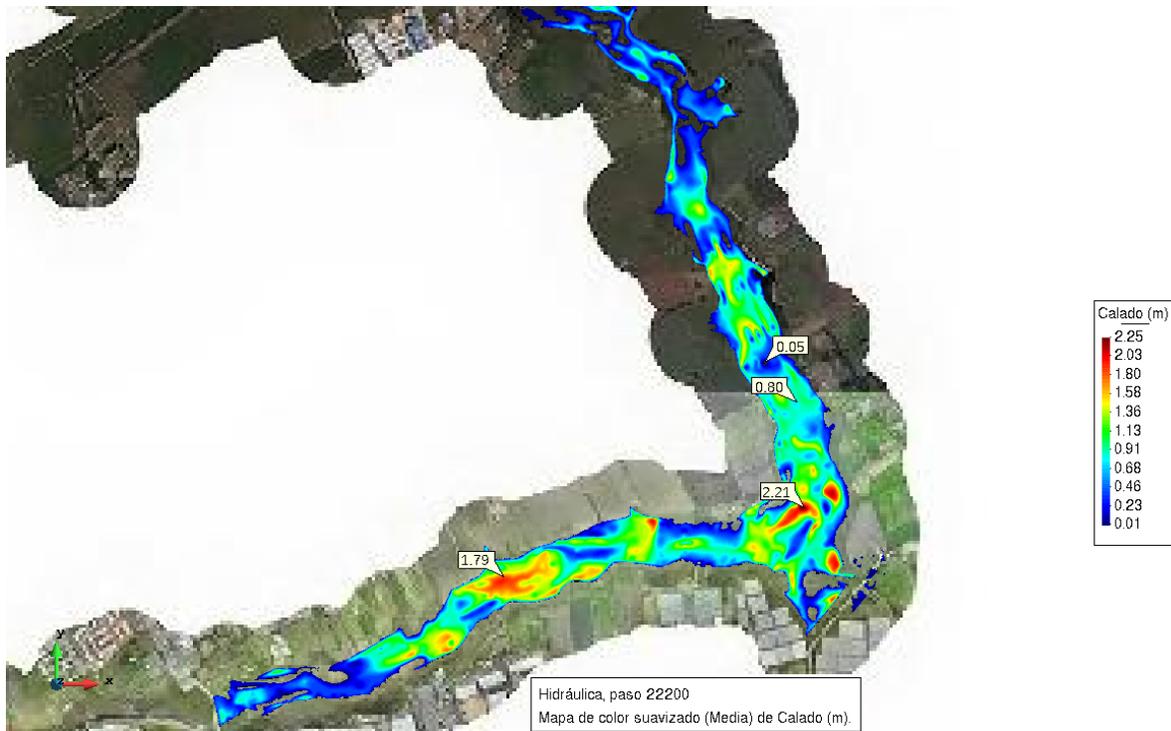


Figura 17. Calado del área de estudio. Fuente propia

Se sabe que el calado o tirante es la profundidad del flujo, que es la distancia vertical del punto más bajo de la sección del canal a la superficie libre del agua, gráficamente se puede ver en la Figura 17, donde se pueden notar las zonas más y menos profundas del humedal. Se colocaron algunas etiquetas en las zonas de color rojo para señalar las mayores profundidades del humedal y en las menos profundas de color azul oscuro, se puede evidenciar como las zonas de mayor profundidad se encuentran ubicadas en el centro de las secciones más amplias del área de estudio, siendo, según la (CAR, 2016) zona donde crece vegetación eneal o de agua dulce, en las zonas bajas algunas especies de vegetación flotante. Las profundidades del humedal varían de 0,01 m a 2,15 m.

A continuación, en la Figura 18, se puede evidenciar la velocidad en el paso 22200, momento donde el modelo ha finalizado de llenar el área de estudio, se puede ver como se producen diferentes velocidades en toda la sección pero que predominan velocidades muy bajas, desde 0 m/s hasta 0,02 m/s, además se logra ver como hay unas velocidades más altas en las zonas donde el área es más pequeña (Figura 19), también se pueden llamar zonas de estrangulamiento, y se entiende como el efecto venturi, si el caudal de un fluido es constante pero la sección disminuye, necesariamente la velocidad aumenta tras atravesar esta sección (Domingo, 2011), además de esta zona en la parte superior del área de estudio, también hay una zona de estrangulamiento en la parte inferior, este estrangulamiento se debe al box culvert que conecta con el río Bogotá y es la salida del modelo.

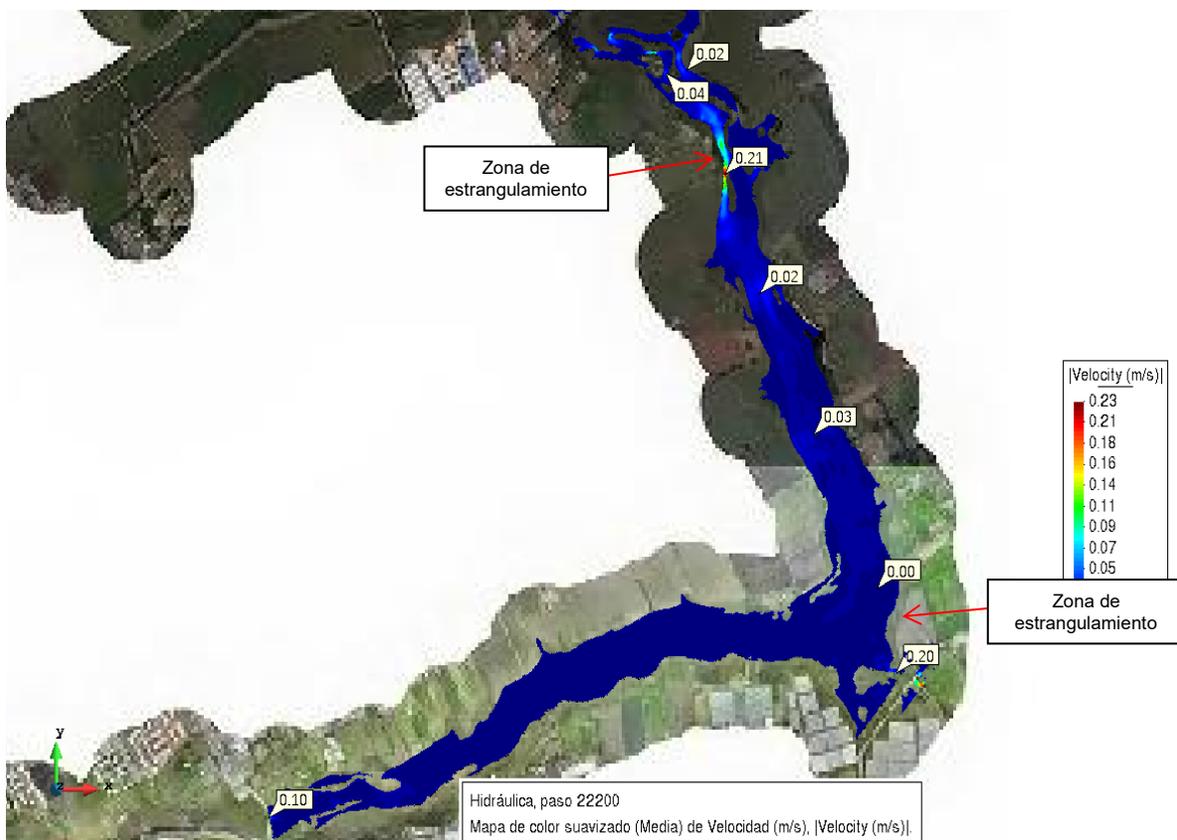


Figura 18. Campo de velocidades del área de estudio. Fuente propia.

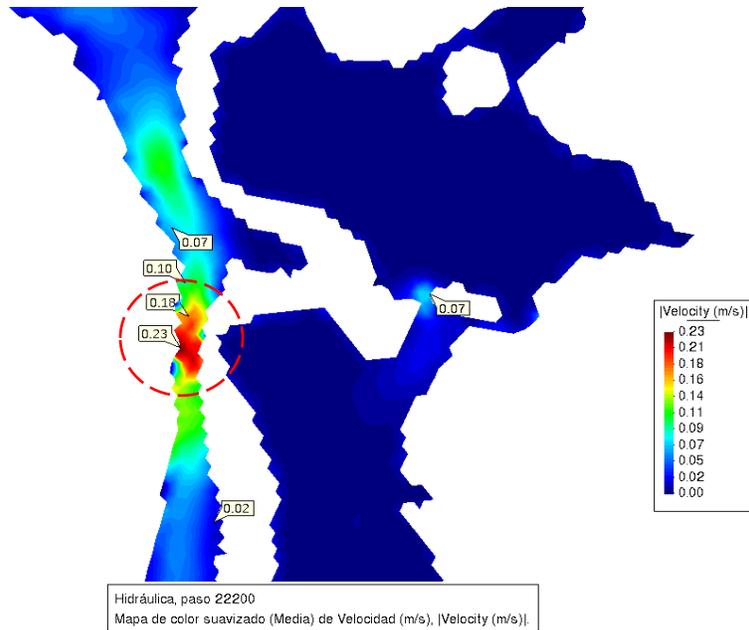


Figura 19. Detalle zona de estrangulamiento en la parte superior del área de estudio. Fuente propia

Esta zona de estrangulamiento se pudo formar debido a los cambios en el terreno causados por rellenos, sedimentos en el humedal o acumulación de vegetación como se puede ver en la Figura 20, donde se puede ver la concentración de vegetación y otros tipos de materiales en esta área del humedal.



Figura 20. Imagen satelital sección del humedal en los años a. 2015 b. 2019 Fuente google earth.

Como se puede ver en la Figura 21, hay secciones de muy bajas velocidades que pueden deberse a las acumulaciones de sedimentos. Además, como se mencionó antes, el humedal presenta velocidades muy bajas, esto puede

ocasionar problemas producto de la resistencia hidráulica presente, como afectar las condiciones de calidad de agua, debido a que en esta zona se hace una profundización constante lo que hace que aumenten la capacidad de almacenamiento y los tiempos de retención.

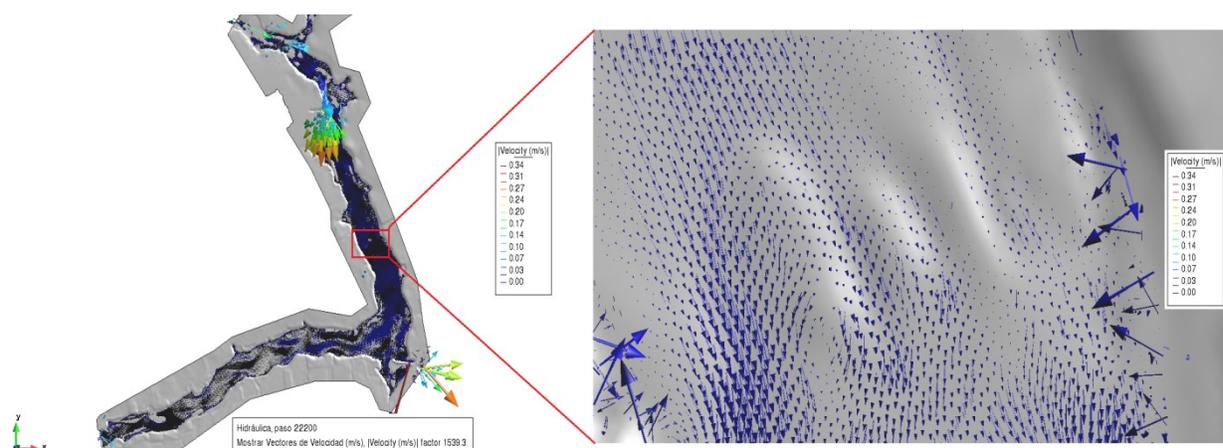


Figura 21. Campo de velocidades en vectores. Fuente propia.

Por otro lado, se obtuvo como resultado la cota de agua, en la Figura 22, se logra ver el comportamiento del humedal durante diferentes pasos (5700, 7800, 10200, 16500, 19500, 22200), como se logra ver, en el único momento donde la cota de agua es superior a 2543 m, siendo esta la cota más alta, es cuando en el modelo se está ingresando el caudal (figura 22a.), además se puede observar cómo en los primeros pasos del agua hay lugares que no se cubren por completo, esto se debe a la topografía del humedal, ya que estas zonas cuentan con cotas mayores que pueden ser causa de acumulación de sedimentos.

Como se puede ver y teniendo en cuenta el análisis de velocidades dónde se señaló que en todos los pasos las velocidades fueron bajas, en el tiempo de modelación la cota aumenta de forma gradual hasta el último paso, aunque posteriormente en la figura 22e y 22f se observa como la cota de agua sigue aumentando pero de manera mucho más lenta hasta que la cota de agua final es de 2540 m.

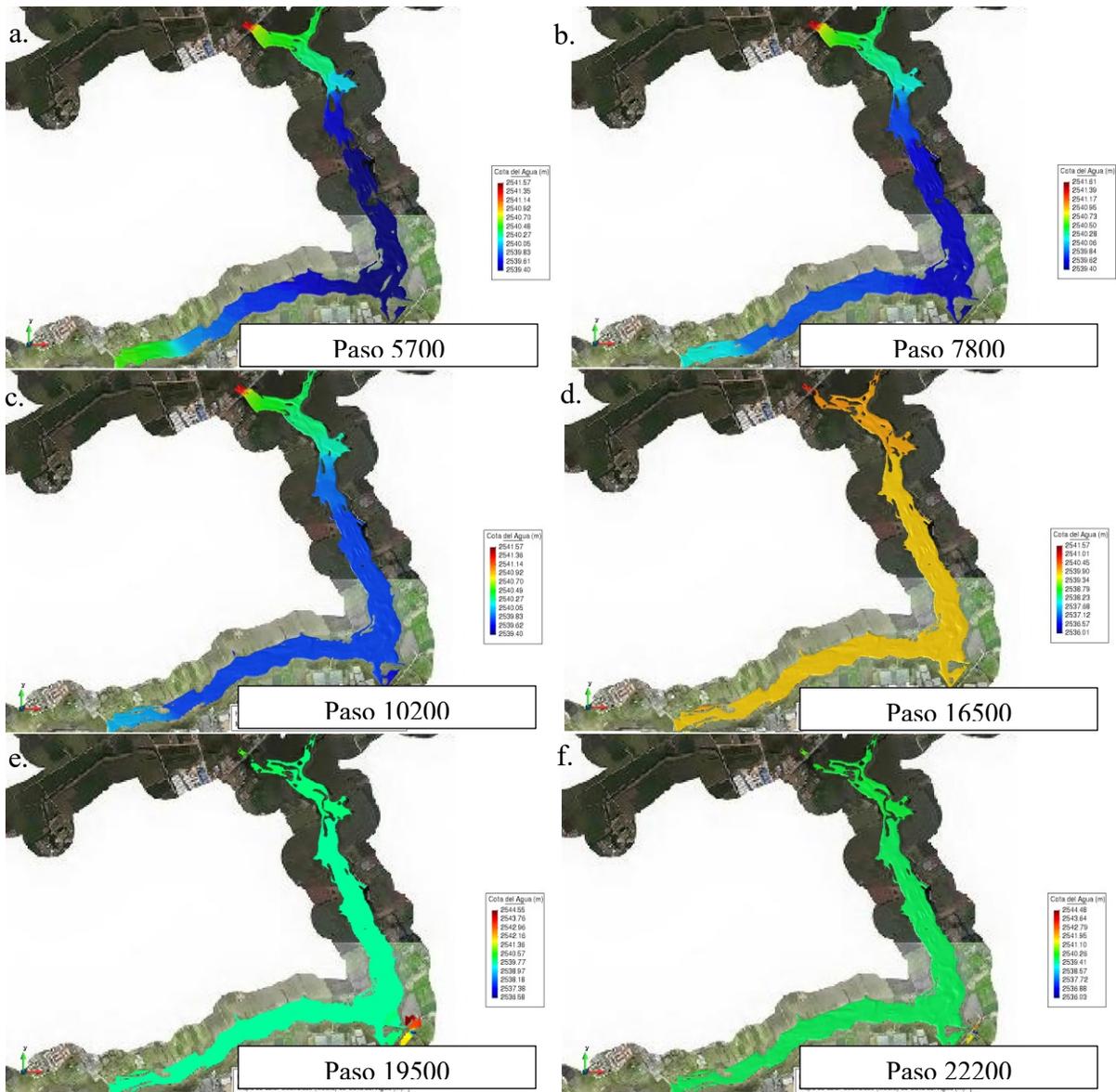


Figura 22. Comportamiento de la cota de agua en los diferentes pasos. Fuente propia.

Cabe mencionar que, aunque el modelo no integre a la vegetación se puede analizar los perfiles de velocidad cuando la altura de la vegetación no es constante asumiendo variaciones del Manning que produce una alteración de la distribución de velocidad en las condiciones actuales, esto quiere decir que las reducciones de velocidad están relacionadas por la vegetación mencionada anteriormente que produce un aumento del nivel de la cota de agua, lo anterior puede ser producto de la vegetación superficial, de fondo o su combinación.



Figura 23. Comportamiento Froude en el humedal paso 5700. Fuente propia.



Figura 24. Comportamiento Froude en el humedal paso 13800. Fuente propia.

---

La clasificación de los flujos de agua son los siguientes: críticos, subcríticos o supercríticos y depende de la relación entre las fuerzas de inercia y de gravitación del flujo. Esta relación es representada mediante el número de Froude, cuando es igual a 1 el flujo es crítico, si por el contrario es mayor a 1, se considera que el flujo es supercrítico. Los flujos supercríticos tienen velocidades relativamente altas y bajas profundidades, y son controlados por condiciones que se dan corriente arriba y que se transmiten corriente abajo. Este es el caso por ejemplo de ríos con en zonas de alta pendiente, como los ríos de montaña. Por otro lado, si el número de Froude es menor a 1, el flujo se cataloga como subcrítico, estos son de velocidades bajas y altas profundidades, y además son controlados por las condiciones que se dan corriente abajo y que se transmiten corriente arriba (Paz, Mendoza, Acuña, Urbina, & González, 2014).

El software Iber muestra como resultado el Número de Froude del área de estudio, cómo se muestra en la Figura 23 y la Figura 24, si se analiza de manera general, se puede ver que el humedal no presenta Froude mayores a 1, exceptuando en los primeros pasos del modelo dónde se puede notar un Froude de 1,08 (Figura 23, parte superior) y además en la zona de estrangulamiento se logra ver una aproximación a 1, es decir existe un flujo supercrítico y crítico en ese paso, esto es causando por la velocidad en el momento del ingreso de caudal al área de estudio, en realidad, si se analiza detalladamente en la parte de la entrada del caudal, se puede ver como hay un resalto hidráulico, ya que pasa de un flujo supercrítico a subcrítico.

Por otro lado, después de esto y casi en los últimos pasos (Figura 24) se puede ver como el número de Froude es muy cercano a 0, siendo un flujo subcrítico esto puede deberse, como se mencionó anteriormente, en las zonas donde  $F=0$ , las velocidades eran muy bajas y no existía un movimiento apreciable.

Finalmente, es importante mencionar que el tiempo máximo ingresado de 22200 segundos, es decir 6 horas y 10 minutos, fue suficiente tiempo de

---

simulación para que el modelo generara los resultados requeridos, en este pasó del pre-proceso se debe ser bastante riguroso y darle el tiempo suficiente para que se realicen todos los cálculos para la cantidad de resultados que se esperan, es necesario entender que entre más resultados se pretendan deberá ser mayor el tiempo máximo ingresado y por lo tanto tardará más, esto puede variar según el tamaño del proyecto y la calidad de la malla de cálculo, además de que el software permite elegir la cantidad de procesadores con los que se quiere ejecutar este proceso, lo cual según la maquina en la que se trabaje puede hacer que el tiempo de simulación disminuya.

---

## 6. Conclusiones y Recomendaciones

A lo largo del presente trabajo de grado, se describen los aspectos más relevantes relacionados con el desarrollo de un modelo hidrodinámico en la zona sur del humedal Gualí. La información aquí presentada no quedaría completa si no se revisan y concluye la información obtenida:

El software Iber es una herramienta que combina sus módulos hidrodinámico, de turbulencia y de transporte de sedimentos, y emplea el método de volúmenes finitos para dar solución a las ecuaciones correspondientes (Bladé et al., 2014a). Cuenta con una interfaz amigable para el usuario y con múltiples herramientas que facilitan su uso y entendimiento, como se mencionó antes cuenta con tres etapas de proceso, de las cuales es importante mencionar algunas observaciones:

- En la etapa del pre-proceso, entre otras funciones, se realiza la generación de la malla de cálculo, a la cual hay que prestar especial atención, ya que es una parte esencial para que los cálculos se ejecuten con mayor aproximación a la realidad. Una malla de cálculo muy fina lleva a resultados mucho más precisos pero el tiempo de cálculo puede ser más largo, sin embargo una malla de cálculo más gruesa conduce a datos menos reales, además si los tamaños de celda son grandes puede provocar resultados erróneos.
- Asimismo, se reconoce que, a fin de representar con mayor exactitud los fenómenos que ocurren en el cuerpo de agua en estudio, es de vital importancia el uso de computadoras de buena capacidad para la resolución de las ecuaciones que gobiernan los parámetros de hidrodinámica y calidad de aguas, por este motivo se realizó la modelación de una pequeña sección del humedal Gualí, puesto que era una malla muy densa y la cantidad de datos no eran procesados con satisfacción por el equipo del estudiante.

- 
- Como se mencionó antes, el modelado bidimensional requiere un tiempo de cálculo más largo y conlleva una mayor capacidad de cálculo, debido a todos los procesos que debe realizar, además depende de los resultados que se quieren obtener (e.g. (Guaya & Montalván, 2018)).

Es importante resaltar que la importancia que tiene la modelación de las características físicas, químicas y biológicas de un humedal radica en la repercusión que tiene en diferentes áreas de investigación, esto con el fin de despertar el interés de otros en la implementación de este software, debido a la cantidad de funciones y campos que puede llegar a abarcar:

- Facilita y permite la extensión del desarrollo de modelos de calidad de agua en regiones donde el recurso es escaso o presenta problemas de contaminación.
- Su aplicación para la evaluación de proyectos de inversión en la construcción de estructuras hidráulicas que aporten o beneficien a cuerpos de agua como los humedales, permitirá conocer, de forma más objetiva, el comportamiento del sistema y su variación bajo condiciones meteorológicas extremas o escenarios de cambio climático.
- Su versatilidad de importación y exportación de archivos, facilita el uso no solo de este sino de una amplia diversidad de software para el análisis de cuerpos hídricos mediante la modelación de diferentes características en tiempo real, mediante la actualización continua de sus condiciones hidroclimatológicas.

Después de realizar la modelación a la sección de la zona sur del humedal, este trabajo de grado puede ser utilizado como guía para el análisis hidrodinámico y de calidad de agua de todo el humedal Gualí, con el fin de ver el comportamiento de todo este y poder hacer un análisis más amplio haciendo uso total de la batimetría brindada por la CAR, además para un análisis más completo podría realizarse un monitoreo de la calidad de agua, de sedimentos,

---

y tener en cuenta el tipo de vegetación que se encuentra en este para cada una de las zonas del humedal a modelar, se sugiere el uso del Iber por la cantidad de herramientas que brinda, además se recuerda que el uso de un software en dos dimensiones da resultados mucho más precisos.

Por otro lado, a pesar de que el humedal Gualí fue declarado como un área protegida por la Corporación Autónoma Regional, permaneció muchos años bajo condiciones de rellenos, vertimientos de aguas residuales, como receptor de escombros y basuras, lo cual afectó el estado y funcionamiento del mismo y causó alteraciones, modificaciones y degradación del ecosistema y todos sus componentes. Cabe resaltar, que, este cuerpo de aguas es receptor de diversos tipos de aves migratorias y hogar de especies en peligro de extinción; así como de diferentes anfibios y reptil.

Finalmente, teniendo en cuenta los resultados y la situación actual del humedal, es recomendable realizar obras de intervención en el humedal, protegiendo su biodiversidad y evitando, en lo posible, la alteración de su equilibrio ecológico. Una de ellas podría ser la realización de dragados con el objetivo de retirar basuras y sedimentos, esto para ayudar a la recirculación del agua en el humedal y crear nuevos espejos de agua. Además se podría reubicar la acumulación de vegetación y crear “islas” que funcionen como refugio para la fauna ya que como se mencionó antes la urbanización desplazó muchas de las especies.

Además, si en el desarrollo vial de los municipios aledaños al humedal se quiere intervenir sobre el humedal, se recomienda evitar el relleno de este y optar por la construcción de puentes ya sean vehiculares o peatonales, para así mismo evitar la alteración del ecosistema.

---

## 7. Referencias

- Aburto Castañeda, S. (2011). *Análisis y modelación del proceso de nitrificación en sistemas experimentales que simulan humedales artificiales*. México, D.F.
- Adams, T. E., Chen, S., & Dymond, R. (2018). Results from Operational Hydrologic Forecasts Using the NOAA/NWS OHRFC Ohio River Community HEC-RAS Model. *Journal of Hydrologic Engineering*, *23*(7), 04018028. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0001663](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001663)
- Alcorlo, P. (2012). Los humedales en España - Guía Nueva Cultura del Agua. Retrieved April 12, 2020, from <https://www.fnca.eu/guia-nueva-cultura-del-agua/agua-y-ecosistemas/humedales?&imprimir=1>
- Barbosa Casas, S. A. (2013). *MODELACIÓN HIDRODINÁMICA Y DE CALIDAD DE AGUA DEL SISTEMA INTEGRADO EMBALSE MUÑA-RÍO BOGOTÁ*. Universidad de Colombia. Retrieved from <http://bdigital.unal.edu.co/45402/1/80120326.2013.pdf>
- Benayas, R. (2015). ¿Conoces Iber? Retrieved March 26, 2019, from <https://www.cursosgis.com/conoces-iber/>
- Betancur Pérez, G. (2013). Metodología para la Selección de Modelos Hidrodinámicos Tridimensionales, 131. Retrieved from <http://www.bdigital.unal.edu.co/11664/>
- Bierkens, M. F. P., Bell, V. A., Burek, P., Chaney, N., Condon, L. E., David, C. H., ... Wood, E. F. (2015). Hyper-resolution global hydrological modelling: what is next? *Hydrological Processes*, *29*(2), 310–320. <https://doi.org/10.1002/hyp.10391>
- Bladé, E., Cea, L., Corestein, G., Escolano, E., Puertas, J., Vázquez-Cendón, E., ... Coll, A. (2014a). Iber: herramienta de simulación numérica del flujo en ríos. *Revista Internacional de Métodos Numéricos Para Cálculo y Diseño En Ingeniería*, *30*(1), 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.rimni.2012.07.004>
- Bladé, E., Cea, L., Corestein, G., Escolano, E., Puertas, J., Vázquez-Cendón, E.,

- 
- ... Coll, A. (2014b). Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería Iber: herramienta de simulación numérica del flujo en ríos. *Revista Internacional de Métodos Numéricos Para Cálculo y Diseño En Ingeniería*, 30(1), 1–10.  
<https://doi.org/10.1016/j.rimni.2012.07.004>
- Bladé, E., Gómez-Valentín, M., Dolz, J., Aragón-Hernández, J. L., Corestein, G., & Sánchez-Juny, M. (2012). Integration of 1D and 2D finite volume schemes for computations of water flow in natural channels. *Advances in Water Resources*, 42, 17–29.  
<https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2012.03.021>
- Brink, P. ten, Russi, D., Farmer, A., & Badura, T. (2013). *La Economía de los Ecosistemas y la Biodiversidad relativa al agua y los humedales. Resumen ejecutivo*. Retrieved from [www.ieep.eu](http://www.ieep.eu).
- Burgos Doria, R. (2015). *Significado De Valor Cultural, Natural Y Ambiental Del Humedal Ciénaga Grande Del Bajo Sinú Para Los Habitantes De La Vereda Caño Viejo (Lorica – Córdoba – Colombia)*. Universidad de Manizales. Retrieved from <http://ridum.umanizales.edu.co:8080/xmlui/bitstream/handle/6789/2091/TE-SIS-ROSALÍA-BURGOS-DORIA.pdf?sequence=2&isAllowed=y>
- Calderón Sáenz, F. (2009). *Humedal Gualí-Tres Esquinas su potencial Ecológico, El Productivo, Turístico. Rev. 1 (Vol. 1)*. Bogotá D.C. Retrieved from [http://www.drcalderonlabs.com/Programas\\_Ambientales/El\\_Humedal\\_Guali\\_Tres\\_Esquinas.pdf](http://www.drcalderonlabs.com/Programas_Ambientales/El_Humedal_Guali_Tres_Esquinas.pdf)
- CAR. (2016). *Plan de rehabilitación Humedal Gualí – Tres Esquinas – Lagunas de Funzhé Diagnóstico*. Bogotá D.C.
- CAR. (2018). Empresarios y vecinos del humedal Gualí se vinculan para su conservación | CAR. Retrieved March 9, 2019, from <https://www.car.gov.co/saladeprensa/empresarios-y-vecinos-del-humedal-guali-se-vinculan-para-su-conservacion>
- Caro-Camargo, C. A., & Bayona-Romero, J. A. (2018). Hydro-dynamic modeling

- 
- for identification of flooding zones in the city of Tunja. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, (88), 40–54.  
<https://doi.org/10.17533/udea.redin.n88a05>
- Carvajal Villaplana, Á. (2002). Teorías y modelos: formas de representación de la realidad. *Revista Comunicación*.
- Ceballos L., J. D. (2011). *MODELACIÓN HIDRÁULICA Y MORFODINÁMICA DE CAUCES SINUOSOS APLICACIÓN A LA QUEBRADA LA MARINILLA (ANT)* (Vol. 30). Medellín. Retrieved from <http://www.scielo.org.co/pdf/bcdt/n30/n30a10.pdf>
- Chazarenc, F., Merlin, G., & Gonthier, Y. (2003). Hydrodynamics of horizontal subsurface flow constructed wetlands. *Ecological Engineering*, 21(2–3), 165–173. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2003.12.001>
- Chow, V. T. (1959). *Hidraulica de canales abiertos*. (M. E. Suárez, Ed.). McGraw-Hill.
- Chung, T. J. (2001). *COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS*. Cambridge, United Kingdom. Retrieved from <http://www.cambridge.org>
- Cimbala, J. M., & Cengel, Y. A. (2006). Mecánica de Fluidos: Fundamentos y Aplicaciones. *McGrawHill*, 997.  
<https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Coratierras. (2017, June 9). PROCESO DE RECUPERACIÓN HUMEDAL EL GUALÍ | Coratierra. Retrieved May 5, 2020, from <https://coratierras.org/2017/06/09/en-galeria-proceso-de-recuperacion-cienaga-guali/>
- Dade, W. B. (1993). Near-bed turbulence and hydrodynamic control of diffusional mass transfer at the sea floor. *Limnology and Oceanography*, 38(1), 52–69. <https://doi.org/10.4319/lo.1993.38.1.0052>
- DeVries, B., Huang, C., Armston, J., Huang, W., Jones, J. W., & Lang, M. W. (2020). Rapid and robust monitoring of flood events using Sentinel-1 and Landsat data on the Google Earth Engine. *Remote Sensing of Environment*, 240(August 2019), 111664.

---

<https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111664>

- Diez-Hernández, J. M. (2008). Evaluación hidrodinámica del hábitat ecohidráulico dirigida a la conservación y restauración de hidrosistemas fluviales . *INGENIERÍA E INVESTIGACIÓN*, 28(2), 97–107.
- Domingo, A. M. (2011). Apuntes de Mecánica de Fluidos. *Universidad Politécnica de Madrid*. España.
- Du, J., Park, K., Dellapenna, T. M., & Clay, J. M. (2019). Dramatic hydrodynamic and sedimentary responses in Galveston Bay and adjacent inner shelf to Hurricane Harvey. *Science of The Total Environment*, 653, 554–564. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2018.10.403>
- Dumanski, S., Pomeroy, J. W., & Westbrook, C. J. (2015). Hydrological regime changes in a Canadian Prairie basin. *Hydrological Processes*, 29(18), 3893–3904. <https://doi.org/10.1002/hyp.10567>
- Escobar, J. (2002). *La contaminación de los ríos y sus efectos en las áreas costeras y el mar*. Santiago de Chile. Retrieved from <https://archivo.cepal.org/pdfs/Waterguide/LCL1799S.PDF>
- Escuela Colombiana de Ingeniería. (2008). *TEMPERATURA PROTOCOLO. Curso de Higiene y Seguridad Industrial*. Bogotá .
- Espinosa Villalpando, L. A. (2012). *Áreas de inundación obtenidas mediante Sistemas de Información Geográfica y HEC-RAS, relacionándolas con el efecto de sitio presente en el municipio de Apizaco, Tlaxcala; México*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Fleischmann, A., Paiva, R., & Collischonn, W. (2019). Can regional to continental river hydrodynamic models be locally relevant? A cross-scale comparison. *Journal of Hydrology X*, 3, 100027. <https://doi.org/10.1016/J.HYDROA.2019.100027>
- Fleischmann, A., Siqueira, V., Paris, A., Collischonn, W., Paiva, R., Pontes, P., ... Tanimoun, B. (2018). Modelling hydrologic and hydrodynamic processes in basins with large semi-arid wetlands. *Journal of Hydrology*, 561(September), 943–959. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.04.041>

- 
- García Rodríguez, M. (2003). Clasificación funcional de humedales ribereños. *Tecnología y Desarrollo*, (1), 401.
- García Rodríguez, M. A., & Ruíz Gomez, D. V. (2018). *Modelación hidrodinámica y de calidad del agua en dos dimensiones del cuerpo hídrico léntico zona sur del humedal Capellania, localidad de Fontibon, Bogotá D.C. Colombia con el software IBER*. Universidad Santo Tomas, Bogotá. Retrieved from <https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/14308/2018mariagarcia.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Gardner, R. C. (2015). Estado de los humedales del mundo y de los servicios que prestan a las personas: una recopilación de análisis recientes. *RAMSAR*, 20. Retrieved from <https://www.ramsar.org/sites/default/files/documents/library/bn7s.pdf>
- Guaya, C. I., & Montalván, E. A. (2018). Modelación numérica bidimensional del río Garrapata en la provincia de Manabí aplicando el programa Iber. *Tesis*. Retrieved from <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/19326>
- Henaó Sarmiento, J. E. (2004). *Plan de manejo y propuesta de delimitación de un área natural protegida en el humedal guali-tres esquinas*. Bogotá D.C. Retrieved from <http://sie.car.gov.co/bitstream/handle/20.500.11786/34121/00841.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Hernández, A. M. (2010). *Análisis de la gestión ambiental desde la perspectiva de la gobernabilidad ambiental en los parques ecológicos distritales de humedal de la ciudad de Bogotá D.C*. Pontificia Universidad Javeriana . Retrieved from <https://www.javeriana.edu.co/biblos/tesis/politica/tesis459.pdf>
- Hincapié Marín, D. L. (2007). *Cinética e hidrodinámica aplicadas, en condiciones ambientales locales, a humedales de flujo subsuperficial a escala piloto*. Universidad Tecnológica de Pereira.
- Humboldt. (2017). Humedales al rescate de la sociedad | Biodiversidad 2016.

- 
- Retrieved May 21, 2020, from  
<http://reporte.humboldt.org.co/biodiversidad/2016/cap4/412/#seccion1>
- IDEAM. (2007). *Estudio de la Caracterización Climática de Bogotá y Cuenca Alta del Río Tunjuelo*. Bogotá.
- Jaramillo Villa, Ú., Cortés Duque, J., & Flórez Ayala, C. (2015). COLOMBIA ANFIBIA. Un país de humedales. Volumen 1. (p. 73). Bogotá D.C.: Instituto de Investigación de Recursos Biológicos . Retrieved from <https://studylib.es/doc/8811858/iavh-colombia-anfibia-web-low>
- Kadlec, R. H., & Wallace, S. D. (2009). *Treatment Wetlands* (2nd ed.). Taylor & Francis Group, LLC. Retrieved from <http://www.copyright.com/>
- Kastridis, A., & Stathis, D. (2020). Evaluation of hydrological and hydraulic models applied in typical mediterranean ungauged watersheds using post-flash-flood measurements. *Hydrology*, 7(1).  
<https://doi.org/10.3390/hydrology7010012>
- Katopodis, C. (2003). Case studies of instream flow modelling for fish habitat in canadian prairie rivers. *Canadian Water Resources Journal*, 28(2), 199–216. <https://doi.org/10.4296/cwrj2802199>
- Keddy, P. A. (2010). *Wetland Ecology: Principles and Conservation - Paul A. Keddy - Google Libros* (2nd ed.). New York: Cambridge University Press. Retrieved from [https://books.google.com.co/books?hl=es&lr=&id=eVeaSqFy2VgC&oi=fnd&pg=PR5&dq=Wetland+Ecology:+Principles+and+Conservation+\(Cambridge+Studies+in+Ecology\)&ots=MfY3ch7QHd&sig=xzk6aUAOnSwPr8JzwlMJ1gfBKTm#v=onepage&q=Wetland Ecology%3A Principles and Conservation \(Cambridge Studies in Ecology\)&f=false](https://books.google.com.co/books?hl=es&lr=&id=eVeaSqFy2VgC&oi=fnd&pg=PR5&dq=Wetland+Ecology:+Principles+and+Conservation+(Cambridge+Studies+in+Ecology)&ots=MfY3ch7QHd&sig=xzk6aUAOnSwPr8JzwlMJ1gfBKTm#v=onepage&q=Wetland+Ecology%3A+Principles+and+Conservation+(Cambridge+Studies+in+Ecology)&f=false)
- Kjerfve, B., & Magill, K. . (1989). Geographic and hydrodynamic characteristics of shallow coastal lagoons. *Marine Geology*, 88(3–4), 187–199.  
[https://doi.org/10.1016/0025-3227\(89\)90097-2](https://doi.org/10.1016/0025-3227(89)90097-2)
- Lai, X. J., Huang, Q., & Jiang, J. H. (2012). Wetland inundation modeling of Dongting Lake using two-dimensional hydrodynamic model on

- 
- unstructured grids. *Procedia Environmental Sciences*, 13, 1091–1098.  
<https://doi.org/10.1016/J.PROENV.2012.01.102>
- Lee, S., Yeo, I.-Y., Lang, M. W., McCarty, G. W., Sadeghi, A. M., Sharifi, A., ...  
Liu, Y. (2017). Improving the catchment scale wetland modeling using  
remotely sensed data. *Environmental Modelling & Software*.  
<https://doi.org/10.1016/J.ENVSOFT.2017.11.001>
- Liu, G., & Schwartz, F. W. (2011). An integrated observational and model-  
based analysis of the hydrologic response of prairie pothole systems to  
variability in climate. *Water Resources Research*, 47(2).  
<https://doi.org/10.1029/2010WR009084>
- Loaiza, D. M. (2017). Evaluación del estado de crecimiento de la vegetación por  
medio de imágenes de radar y ópticas Rating of vegetation growth state  
using radar and optical images, (December).
- López, J. J., González, M., Scaini, A., Goñi, M., Valdenebro, J. V., & Gimena, F.  
N. (2012). Caracterización del modelo HEC-HMS en la cuenca de río Arga  
en Pamplona y su aplicación a cinco avenidas significativas. *Obras y  
Proyectos*, (12), 15–30. <https://doi.org/10.4067/s0718-28132012000200002>
- Luna Pabello, V. M., & Aburto Castañeda, S. (2013). Sistema de humedales  
artificiales para el control de la eutroficación del lago del Bosque de San  
Juan de Aragón . *Revista Especializada En Ciencias Químico-Biológicas* .  
[https://doi.org/10.1016/S1405-888X\(14\)70318-3](https://doi.org/10.1016/S1405-888X(14)70318-3)
- MAR Perú. (2013). *Guía de capacitación y entrenamiento a las OUAs*. Perú.  
Retrieved from <http://www.psi.gob.pe/wp-content/uploads/2017/01/Guia-de-Capacitacion-Entrenamiento-Hidrometria.pdf>
- McCauley, L. A., Anteau, M. J., van der Burg, M. P., & Wiltermuth, M. T.  
(2015). Land use and wetland drainage affect water levels and dynamics of  
remaining wetlands. *Ecosphere*, 6(6), art92. <https://doi.org/10.1890/ES14-00494.1>
- McIntosh, B. S., Seaton, R. A. F., & Jeffrey, P. (2007). Tools to think with?  
Towards understanding the use of computer-based support tools in policy

- 
- relevant research. *Environmental Modelling and Software*, 22(5), 640–648.  
<https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2005.12.015>
- MinAmbiente. (2015). Colombia tiene más de 30 mil humedales | Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Retrieved March 9, 2019, from <http://www.minambiente.gov.co/index.php/component/content/article/noticias/1659-se-revela-mapa-de-humedales-en-colombia>
- Mitsch, W. J., & Gosselink, J. G. (2001). *Wetlands (third edition)*. (John Wiley & Sons, Ed.), *Regulated Rivers: Research & Management* (3rd ed., Vol. 17). New York: Wiley. <https://doi.org/10.1002/rrr.637>
- Mitsch, William J, & Gosselink, J. G. (2000). *The value of wetlands: importance of scale and landscape setting*. *Ecological Economics* (Vol. 35). Retrieved from [www.elsevier.com/locate/ecocon](http://www.elsevier.com/locate/ecocon)
- Moreno, V., García, J. F., & Carlos Villalba, J. (2000). *Descripción*. Retrieved from [www.sogeocol.edu.co](http://www.sogeocol.edu.co)
- Munguía Balvaner, E., Blanco Piñón, A., & Alavez-Ramírez, J. (2016). Hydrodynamic Analysis of Rectangular Channels Network Using Twodimensional Numerical Simulations. *Ingeniería y Ciencia*, 12(23), 73–92. <https://doi.org/10.17230/ingciencia.12.23.4>
- Murillo, J., Brufau, P., & García-Navarro, P. (2008). Aplicación del modelo bidimensional GUAD-2D, (January 2014).
- Musner, T., Bottacin-Busolin, A., Zaramella, M., & Marion, A. (2014). A contaminant transport model for wetlands accounting for distinct residence time bimodality. *Journal of Hydrology*, 515, 237–246. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.04.043>
- Ochoa García, S., Reyna, T., Reyna, S., García, M., Patalano, A., & Labaque, M. (2014). Evaluación de modelos hidrodinámicos para representar flujos en cauces naturales, (December).
- Paz, A., Mendoza, Á., Acuña, R., Urbina, D., & González, M. (2014). ALGORITMOS Y APLICACIONES PARA EL MONITOREO DE VARIABLES ESENCIALES DE LA BIODIVERSIDAD EN HUMEDALES.

---

*Centro de Análisis y Síntesis (CAS) - Laboratorio de Genética de La Conservación Programa de Gestión de Información y Conocimiento Instituto Humboldt, 014, 21. Retrieved from*

[http://repository.humboldt.org.co/bitstream/handle/20.500.11761/9606/1511Documento técnico mapa diversidad filogenetica.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://repository.humboldt.org.co/bitstream/handle/20.500.11761/9606/1511Documento_técnico_mapa_diversidad_filogenetica.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

Ramos-Fuertes, A., Marti-Cardona, B., Bladé, E., & Dolz, J. (2013).

Envisat/ASAR Images for the Calibration of Wind Drag Action in the Doñana Wetlands 2D Hydrodynamic Model. *Remote Sensing*, 6(1), 379–406. <https://doi.org/10.3390/rs6010379>

Ramsar. (2006). *Manual de la Convención de Ramsar. Guía a la Convención sobre los Humedales*. Irán. Retrieved from

[https://www.ramsar.org/sites/default/files/documents/pdf/lib/lib\\_manual2006s.pdf](https://www.ramsar.org/sites/default/files/documents/pdf/lib/lib_manual2006s.pdf)

Ramsar. (2016). La importancia de los humedales | Ramsar. Retrieved March 9, 2019, from <https://www.ramsar.org/es/acerca-de/la-importancia-de-los-humedales>

Rangel, J. O. (2015). La biodiversidad de Colombia: significado y distribución regional. *Scielo*, 25. Retrieved from

<http://www.scielo.org.co/pdf/racefn/v39n151/v39n151a05.pdf>

Rangel Peraza, J. G. (2012). *Desarrollo de un modelo hidrodinámico y de calidad del agua en la presa de Aguamilpa (Nayarit, México)*. Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del estado de Jalisco, A.C., Guadalajara, Jalisco. Retrieved from

[https://ciatej.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1023/23/1/Jesús Gabriel Rangel Peraza.pdf](https://ciatej.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1023/23/1/Jesús_Gabriel_Rangel_Peraza.pdf)

Riddell, E., Everson, C., Clulow, A., & Mengistu, M. (2013). The hydrological characterisation and water budget of a South African rehabilitated headwater wetland system. *Water SA*, 39(1), 57–67.

<https://doi.org/10.4314/wsa.v39i1.8>

- 
- Rock, C., & Rivera, B. (2014). La calidad del agua, E. Coli y su salud. *COLLEGE OF AGRICULTURE AND LIFE SCIENCES*, 1. Retrieved from <https://extension.arizona.edu/sites/extension.arizona.edu/files/pubs/az1624s.pdf>
- Rodríguez-Rincón, J.P., Pedrozo-Acuña, A., Arganis-Juárez, M., Domínguez-Mora, R., & González Villareal, F. J. (2015). Estimation of probabilistic flood inundation maps for an extreme event: Pánuco River, México. *Journal of Flood Risk Management*, 8(2), 177–192. <https://doi.org/10.1111/jfr3.12067>
- Rodríguez-Rincón, Juan Pablo, Pedrozo-Acuña, A., Domínguez, R. M., & González-Villareal, F. (2014). Flood risk from extreme events in Mexico. *11th International Conference on Hydroinformatics*, (August), 1–8.
- Román Botero, R. (2011). *Caracterización espacio temporal de la estructura térmica de un embalse tropical poco profundo, abastecido parcialmente por bombeo*. Universidad Nacional de Colombia, Medellín.
- Rosenberry, D. O., & Hayashi, M. (2013). Assessing and Measuring Wetland Hydrology. In *Wetland Techniques* (pp. 87–225). Dordrecht: Springer Netherlands. [https://doi.org/10.1007/978-94-007-6860-4\\_3](https://doi.org/10.1007/978-94-007-6860-4_3)
- Salvia, M., Franco, M., Grings, F., Perna, P., Martino, R., Karszenbaum, H., & Ferrazzoli, P. (2009). Estimating Flow Resistance of Wetlands Using SAR Images and Interaction Models. *Remote Sensing*, 1(4), 992–1008. <https://doi.org/10.3390/rs1040992>
- Sánchez San Román, J. (2015). *Calculo de la Precipitación Neta mediante el método del S.C.S.*. España. Retrieved from [http://hidrologia.usal.xn--espg1http-21a//www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detailfull/national/water/?cid=stelprdb1042901](http://hidrologia.usal.xn--espg1http-21a/www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detailfull/national/water/?cid=stelprdb1042901)
- Sharley, D. J., Sharp, S. M., Marshall, S., Jeppe, K., & Pettigrove, V. J. (2017). Linking urban land use to pollutants in constructed wetlands: Implications for stormwater and urban planning. *Landscape and Urban Planning*, 162,

---

80–91. <https://doi.org/10.1016/J.LANDURBPLAN.2016.12.016>

- Shen, Y., & Diplas, P. (2008). Application of two- and three-dimensional computational fluid dynamics models to complex ecological stream flows. *Journal of Hydrology*, *348*(1–2), 195–214. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.09.060>
- Siqueira, V. A., Paiva, R. C. D., Fleischmann, A. S., Fan, F. M., Ruhoff, A. L., Pontes, P. R. M., ... Collischonn, W. (2018). Toward continental hydrologic–hydrodynamic modeling in South America. *Hydrology and Earth System Sciences*, *22*(9), 4815–4842. <https://doi.org/10.5194/hess-22-4815-2018>
- Toimil, A., Losada, I. J., & Camus, P. (2016). Metodología para el análisis del efecto del cambio climático en la inundación costera: aplicación a Asturias. *RIBAGUA*, 56–65. <https://doi.org/10.1016/j.riba.2016.07.004>
- TONIOLO, H. (2009). Numerical simulation of sedimentation processes in reservoirs as a function of outlet location. *International Journal of Sediment Research*, *24*(3), 339–351. [https://doi.org/10.1016/S1001-6279\(10\)60008-X](https://doi.org/10.1016/S1001-6279(10)60008-X)
- Torres-Bejarano, F., Padilla Coba, J., Rodríguez Cuevas, C., Ramírez León, H., & Cantero Rodelo, R. (2016). La modelación hidrodinámica para la gestión hídrica del embalse del Guájaro, Colombia. *Revista Internacional de Metodos Numericos Para Calculo y Diseno En Ingenieria*, *32*(3), 163–172. <https://doi.org/10.1016/j.rimni.2015.04.001>
- Vasco, S., & Sanchez, L. (2017). *ANÁLISIS DE LA GESTIÓN AMBIENTAL DEL HUMEDAL GUALÍ TRES ESQUINAS, VEREDA EL HATO (FUNZA-CUNDINAMARCA)*. Retrieved from [http://repository.udistrital.edu.co/bitstream/11349/5920/1/VASCO\\_ZAMUDIO\\_SORANLLY\\_PAOLA\\_2017.pdf](http://repository.udistrital.edu.co/bitstream/11349/5920/1/VASCO_ZAMUDIO_SORANLLY_PAOLA_2017.pdf)
- Vidal, L. F., & Delgado, J. (2013). Factores de la vulnerabilidad de los humedales altoandinos de Colombia al cambio climático Global. *Cuadernos de Geografía*, *22*, 69–85.

- 
- Villamizar Hernández, A. (2014). *Aplicación de un modelo turbulento bidimensional para la simulación de flujo a superficie libre en un canal horizontal*. Universidad Nacional de Colombia. Retrieved from <http://bdigital.unal.edu.co/47755/1/1033710750.2015.pdf>
- Wurl, J., Martínez García, C. N., & Imaz Lamadrid, M. Á. (2014). Caracterización del peligro por inundaciones en el oasis La Purísima, Baja California Sur, México. *Universidad Autónoma de Baja California Sur*.
- Yang, C., Jiang, C., & Kong, Q. (2010). A graded sediment transport and bed evolution model in estuarine basins and its application to the Yellow River Delta. *Procedia Environmental Sciences*, 2, 372–385.  
<https://doi.org/10.1016/J.PROENV.2010.10.042>
- Zhang, Y., Wang, G., & Wang, Y. (2011). Changes in alpine wetland ecosystems of the Qinghai-Tibetan plateau from 1967 to 2004. *Environmental Monitoring and Assessment*, 180(1–4), 189–199.  
<https://doi.org/10.1007/s10661-010-1781-0>

---

## **Anexos**

A este trabajo de grado se anexa un CD donde se encontrarán anexos:

- a. Listado de coordenadas batimétricas del humedal Gualí**
- b. Registros de la estación climatológica La Ramada.**