



UNIVERSIDAD DE  
COSTA RICA

# EIB

Escuela de  
**Ingeniería de Biosistemas**

**Universidad de Costa Rica**

**Facultad de Ingeniería**

**Escuela de Ingeniería de Biosistemas**

**Balance hídrico en los estanques acuícolas de la “Finca Madre” de la empresa  
Aquacorporación Internacional S.A. debido a la producción de tilapia (*Oreochromis  
niloticus*)**

**Estudiante: Juan Bautista Ulloa Mora, [juan.ulloamora@ucr.ac.cr](mailto:juan.ulloamora@ucr.ac.cr)**

**Carné: B67226**

**Director: Juan Benavides Valverde, Ph.D.**

**Asesor: José Francisco Aguilar Pereira, M.Sc.**

**Asesor: Ronald Aguilar Álvarez, Ph.D.**

**2024**

## HOJA DE APROBACIÓN

Este Trabajo Final de Graduación fue aceptado por la Comisión de Trabajos Finales de Graduación de la Escuela de la Ingeniería de Biosistemas de la Universidad de Costa Rica, como requisito para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Agrícola y de Biosistemas.

*Juan B. Ulloa*

---

Juan Bautista Ulloa Mora

Estudiante

*Juan Benavides Valverde*

---

Ing. Juan Benavides Valverde, Dr.  
Director Trabajo Final de Graduación

*José Francisco Aguilar Pereira*

---

Ing. José Francisco Aguilar Pereira, M.Sc.  
Comité Asesor

*Ronald Aguilar Álvarez*

---

Ing. Ronald Aguilar Álvarez, Dr.  
Comité Asesor

*Alejandra Rojas González*

---

Ing. Alejandra Rojas González, Dr.  
Presidente Tribunal Examinador

*Melissa Rojas Downing*

---

Ing. María Melissa Rojas Downing, Dr.  
Lectora invitada

## **Agradecimientos**

A la Universidad de Costa Rica y a la Escuela de Ingeniería de Biosistemas por mi formación profesional. A los profesores de esta, especialmente a los profesores Juan, Francisco y Ronald que fueron lectores de este TFG.

A la profesora Melissa Rojas Downing por la revisión de este TFG y las correcciones y mejoras que realizó para presentarlo.

Al profesor Felipe Calleja por su ayuda con el laboratorio de hidráulica en el INII y sus consejos para este TFG.

Al profesor Roberto Villalobos por su tiempo, por acompañarme y disponer de tiempo para las pruebas en el INII para el sensor.

A mi jefe en Aquacorporación: Diego Salas, por abrirme las puertas a esta empresa, darme consejos para mi vida profesional y ser un apoyo a lo largo de los años de este TFG.

A mis compañeros de trabajo en Aquacorporación: Carlos, Franklin, Victor, Esteban y Fernanda, que fueron un apoyo y un pilar en los meses que estuve en Cañas realizando mi TFG.

A mis compañeros de universidad que estuvieron en estos años conmigo y familiares, y a Dios por nunca abandonarme.

## **Dedicatoria**

A mí mismo, por seguir siempre adelante, a pesar de las adversidades.

Gracias a mi psicóloga Maribelle Calderón por recordarme lo valioso que soy.

## Resumen

A nivel mundial se vive una crisis en torno al agua, los balances hídricos están bajo presión, en algunas partes del mundo se tienen niveles de estrés hídrico alto y en otras se tiene una mala gestión del recurso hídrico. Por esta razón se debe tener un control del recurso hídrico en la producción alimentaria ya que en algunas actividades se necesita grandes volúmenes de agua para producir. La empresa Aquacorporación Internacional se dedica a la producción de tilapia y debido a las exigencias de los mercados internacionales y las diferentes normativas, desean conocer el caudal de agua que entra dentro de la “Finca Madre” donde se realiza la producción intensiva como semi-intensiva de tilapia y así mejorar su sistema productivo.

Este estudio tiene como objetivo realizar el balance hídrico dentro de la “Finca Madre” en la empresa anteriormente citada, y crear un prototipo de sensor que permite conocer el caudal de agua que pasa por la finca.

Se usó un sensor ultrasónico US-100 y un microprocesador ESP32-WROOM-U para medir el tirante de agua y este asociarlo con un caudal a través de una curva de descarga, se tomaron mediciones en laboratorio como en campo para ver la exactitud de estas. Se encontró que tanto a nivel de laboratorio como en campo el error del sensor ultrasónico US-100, fue menor a 5 cm que es lo recomendable para mediciones en hidrometría.

Por otra parte, para el cálculo del balance hídrico se consideraron las pérdidas por evaporación e infiltración en los estanques y canales, se tomaron mediciones en campo para cumplir con este objetivo. Se obtuvo que el total de las pérdidas de la “Finca Madre” es de 4,08 a 4,09 Hm<sup>3</sup>, en los meses de estudio la mayor pérdida se debe a la infiltración en los canales. Además, que de un total de 8 m<sup>3</sup>/s que pasan por la finca de agua, se utilizan entre un 19,70 a un 19,72%.

## Índice de contenido

1.INTRODUCCIÓN.....	13
1.1.Importancia y justificación .....	13
1.2.Delimitación del problema .....	14
2.OBJETIVOS .....	16
2.1. Objetivo General.....	16
2.2. Objetivos Específicos .....	16
3. MARCO TEÓRICO .....	16
3.1. Estanques acuícolas .....	16
3.1.1. Antecedentes en balances hídricos en estanques acuícolas .....	16
3.1.2. Hidrología en estanques acuícolas.....	17
3.1.3. Infiltración .....	17
3.1.3.1. Coeficiente de permeabilidad .....	18
3.1.3.2. Métodos de medición de infiltración .....	18
3.1.3.2.1. Método de Porchet.....	18
3.1.3.3. Métodos para controlar la infiltración .....	19
3.1.4. Evaporación .....	19
3.1.4.1. Evaporación en cuerpos de agua estáticos.....	19
3.1.4.2. Métodos para controlar la evaporación .....	19
3.1.4.3. Evaporímetro clase A .....	19
3.1.4.4. Evaporación y evapotranspiración en Costa Rica .....	20
3.1.5.Evapotranspiración .....	20
3.2. Pérdidas en canales abiertos .....	20
3.2.1. Infiltración en canales abiertos no revestidos.....	21
3.3 Métodos de medición de caudal .....	21
3.3.1. Método por velocidad y sección transversal.....	21
3.3.1.1. Método de la sección media (mean section method, en inglés) .....	22
3.3.1.2. Método de la sección intermedia (mid section method, en inglés) .....	22
3.3.2. Nivel del agua.....	23
3.3.3. Nivel de referencia.....	23
3.3.4. Medición de velocidad.....	23
3.3.4.1. Método de los dos puntos .....	23

3.3.4.2. Distribución de la velocidad en una sección transversal .....	24
3.3.5. Métodos de medición continua.....	24
3.3.5.1. Método de medición de caudal por etapas (stage discharge method, en inglés).....	24
3.3.5.2. Medición a través de estructuras hidráulicas.....	25
3.4. Sensores ultrasónicos en superficies de agua .....	25
3.4.1. Antecedentes en el uso de sensores ultrasónicos en mediciones de tirantes de agua.....	25
3.4.1.1. Ríos.....	25
3.4.1.2. Canales.....	25
3.4.1.3. Vertederos.....	26
3.4.1.4. Otros estudios .....	27
3.4.2. Componentes electrónicos y herramientas informáticas .....	27
3.4.2.1. Placa de desarrollo: Arduino .....	27
3.4.2.2. ESP32 .....	28
3.4.2.3. Sensor ultrasónico.....	28
3.4.2.3.1. Ángulo efectivo o haz efectivo .....	28
3.4.2.3.2. Sensor ultrasónico US-100 .....	29
3.4.2.4. Pantalla LCD .....	30
3.4.2.5. Protoboard .....	30
3.4.2.9. Arduino IDE .....	30
4. METODOLOGÍA.....	31
4.1 Caracterización de la zona de estudio.....	31
4.2 Diagrama de la metodología.....	32
4.3. Ensamblaje y calibración del sensor ultrasónico para medir el tirante de agua “SUTA” .....	34
4.3.1. Montaje del sensor “SUTA” para las pruebas realizadas en el laboratorio y pruebas preliminares en campo.....	34
4.3.1.1. Pruebas en laboratorio para verificación de precisión del sensor “SUTA”.....	35
4.3.1.2. Pruebas en campo preliminares .....	36
4.3.2. Montaje del prototipo del sensor en físico.....	38
4.3.4. Costos .....	38
4.4. Cálculo del balance hídrico .....	39
4.4.1. Cálculo del área .....	39
4.4.1.1. Área total del espejo de agua de los estanques.....	39
4.4.1.2. Área utilizada de espejo de agua para el cálculo de la infiltración.....	40

4.4.2. Pérdidas de agua en los estanques acuícolas .....	40
4.4.2.1. Evaporación en los estanques .....	40
4.4.2.1.1. Volumen de agua perdido en los estanques por evaporación .....	41
4.4.3. Infiltración de agua en los estanques .....	41
4.4.3.1. Infiltración de agua en los estanques .....	42
4.4.3.2. Mapeo de la prueba de infiltración .....	43
4.4.3.3. Métodos estadísticos considerado para cálculo de infiltración en estanques .....	45
4.4.3.4. Volumen de agua perdido en los estanques por infiltración .....	45
4.4.4. Pérdidas en los canales .....	45
4.4.4.1. Ancho y largo de los canales .....	45
4.4.4.2. Pérdidas por evaporación e infiltración en los canales .....	46
4.4.4.2.1. Tirante de agua .....	46
4.4.4.2.2. Infiltración .....	46
4.4.4.2.3. Evaporación .....	47
4.4. Pérdidas totales de agua dentro de la finca .....	47
4.5. Caudal .....	48
4.5.1. Medición de caudal en la entrada principal .....	48
4.5.2. Curva de descarga .....	49
4.5.3. Medición de caudal en entradas y salidas .....	49
5. RESULTADOS .....	52
5.1. Sensor ultrasónico “SUTA” .....	52
5.1.1. Pruebas en laboratorio .....	52
5.1.2. Pruebas en campo .....	56
5.1.3. Montaje del sensor .....	60
5.1.3.1 Programación .....	60
5.1.3.2. Configuración en la plataforma Thiger.io .....	61
5.1.3.3 Montaje en físico .....	65
5.1.3.5 Costos .....	67
5.2. Balance hídrico .....	67
5.2.1. Área de los estanques .....	67
5.2.2. Pérdidas de agua en los estanques .....	68
5.2.3. Evaporación en los estanques .....	68
5.2.4. Infiltración en los estanques .....	70



5.2.5. Pérdidas en los canales .....	77
5.2.5.1. Muestro de tirantes de agua .....	77
5.2.5.2. Pérdidas por evaporación e infiltración en los canales .....	79
5.2.3. Estimación de las pérdidas de agua dentro de la Finca Madre .....	81
5.2.4. Aforos y caudal.....	83
5.2.4.1. Análisis del perfil me los canales .....	83
5.2.4.2. Cálculos del caudal en la entrada principal .....	84
5.2.4.3. Aforos y cálculo del caudal en las entradas y salidas de la “Finca Madre” .....	87
6. CONCLUSIONES.....	91
7.RECOMENDACIONES .....	93
8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	94
9. ANEXOS .....	102

## Índice de figuras

<b>Figura 1.</b> Balance hídrico en un estanque acuícola. ....	17
<b>Figura 2.</b> Método de Porchet para medir la infiltración del agua en el suelo. ....	18
<b>Figura 3.</b> Pérdidas de agua en un canal no revestido. Fuente: adaptado de Sameh et al. (2023). ....	20
<b>Figura 4.</b> Método de los dos puntos. ....	23
<b>Figura 5.</b> Ejemplo de distribución de la velocidad en un canal transversal. ....	24
<b>Figura 6.</b> ESP32-WROOM-32U. ....	28
<b>Figura 7.</b> Ángulo efectivo de un sensor ultrasónico. ....	29
<b>Figura 8.</b> Sensor ultrasónico US-100. ....	29
<b>Figura 9.</b> Pantalla LCD 16X2. ....	30
<b>Figura 10.</b> Protoboard. ....	30
<b>Figura 11.</b> “Finca Madre” en Cañas, Guanacaste. ....	31
<b>Figura 12.</b> Circulación del agua dentro de la “Finca Madre”. Las líneas amarillas indican la dirección del flujo de agua. ....	32
<b>Figura 13.</b> Diagrama de flujo del objetivo 1 del presente estudio. ....	33
<b>Figura 14.</b> Diagrama de flujo del objetivo 2 del presente estudio. ....	33
<b>Figura 15.</b> Montaje del circuito para realizar las pruebas con el sensor “SUTA”. ....	34
<b>Figura 16.</b> Montaje del sensor en una sección del canal ....	35
<b>Figura 17.</b> Diagrama de lectura del tirante de agua bajo el uso del sensor “SUTA”. ....	36
<b>Figura 18.</b> a) Lugar de instalación del sensor en campo, b) posición del sensor con respecto al nivel del agua y c) vista del sensor desde la orilla del canal. ....	37
<b>Figura 19.</b> Montaje del prototipo del sensor en físico para luego su colocación en campo (con fines ilustrativos). ....	38
<b>Figura 20.</b> Vista aérea de la Finca Madre. Estanques usados para medir área en campo. Los recuadros en amarillo y enumerados son los tanques que se les midió el área. ....	39
<b>Figura 21.</b> Estanques de concreto dentro de la “Finca Madre”. Los recuadros en amarillos muestran los tanques en concreto. ....	40
<b>Figura 22.</b> Prueba de infiltración en a) estanque 60 y b) estanque 535, c) suelos saturados donde se realizaron las pruebas y d) colocación de piedra en el fondo del agujero. ....	43
<b>Figura 23.</b> Mapeo de los estanques en los cuales se realizaron las pruebas de infiltración. a) “Finca A”, b) “Finca B” y c) “Finca Santa Paula”. Los recuadros en amarillo muestran los estanques donde se realizaron las pruebas mencionadas. ....	44
<b>Figura 24.</b> Medición de canales a través de Google Earth. Las líneas de colores representan los canales y como se enumeraron. ....	46
<b>Figura 25.</b> Medición de velocidad en el canal de la entrada principal. ....	49
<b>Figura 26.</b> . Puntos de aforo para realizar el balance hídrico (estrellas amarillas 1 y 2: entradas de agua en la finca y estrellas amarillas 3,4 y 5: salidas de agua de la finca). ....	50
<b>Figura 27.</b> Entradas y salidas dentro de la "Finca Madre" a) entrada principal , b) entrada "La Tercera", c) salida en la entrada Finca Santa Paula, d) salida directa al río Cañas y e) salida compuerta CD9-2. ....	51
<b>Figura 28.</b> Condiciones de flujo en el canal de prueba a) toma 2 medición realizada justo después del vertedero con 75 m <sup>3</sup> /h y 0,2% de pendiente, b) y c) toma 3 medición justo antes del vertedero con 75 m <sup>3</sup> /h y 0,2% de pendiente, d) toma 4 justo después del salto hidráulico, e) toma 5 justo en el	

salto hidráulico, f) toma 7 medición bajo condiciones de flujo suave al lado más alejado del canal contrario a la posición del vertedero y g) toma 8 igualmente en el salto hidráulico. ....	55
<b>Figura 29.</b> Torre realizada para medir lecturas con el sensor a distancias mayores a 0,50 m. ....	56
<b>Figura 30.</b> Lecturas realizadas por el sensor en el lapso de tiempo estudiado. Líneas azul oscuro corresponden a los límites inferior mínimo y límite superior máximo, línea gris corresponde al límite central y las líneas celestes el límite inferior y superior. ....	57
<b>Figura 31.</b> Error de la medición del sensor con la medición inicial de 0,55 m. Línea verde corresponde a un error de 1 cm, línea amarilla corresponde a un error de 2 cm y línea roja corresponde a un error de 5 cm. ....	57
<b>Figura 32.</b> Zona donde se colocó el sensor (poco turbulenta). ....	58
<b>Figura 33.</b> Zona preliminar donde se colocó el sensor (muy turbulenta). ....	58
<b>Figura 34.</b> Soporte colocado para la colocación del sensor. ....	59
<b>Figura 35.</b> Recomendaciones para la colocación del sensor. ....	59
<b>Figura 36.</b> Interfaz Thinger.io y en funcionamiento el sensor ultrasónico. ....	61
<b>Figura 37.</b> Introducción del dispositivo en Thinger.io. ....	62
<b>Figura 38.</b> Introducción del almacenamiento de datos en Thinger.io. ....	63
<b>Figura 39.</b> Creación de gráficas de serie de tiempo en Thinger.io. ....	64
<b>Figura 40.</b> Creación de botones en Thinger.io. ....	65
<b>Figura 41.</b> Montaje en físico del sensor a) montaje en placa del ESP32-WROOM-32U con el sensor ultrasónico US-100 y b) ESP32 conectado a la batería de respaldo. ....	66
<b>Figura 42.</b> Pérdidas consideradas en los estanques acuícolas. ....	68
<b>Figura 43.</b> Evapotranspiración (a) y evaporación en los estanques (b), según los datos registrados por la estación meteorológica ubicada en la Finca Madre del 2021 al 2023. ....	70
<b>Figura 44.</b> Distribución de las pruebas de infiltración hechas. Nota: un paréntesis cuadrado indica que el valor si se encuentra dentro del rango mientras que un paréntesis redondo indica que el valor no se encuentra dentro del rango. ....	71
<b>Figura 45.</b> Orden de suelos en Aquacorporación Internacional S.A. ....	72
<b>Figura 46.</b> Calicatas elaboradas por el CIA (2020) cercanas a la zona de estudio. Las estrellas amarillas indican donde se realizó las calicatas. ....	72
<b>Figura 47.</b> División de la finca para estimar el coeficiente de permeabilidad. Las zonas delimitadas en amarillo son las zonas que se dividió la “Finca Madre”. ....	75
<b>Figura 48.</b> a) Ejemplo de estanque con gran cantidad de materia orgánica (al costado derecho) y b) ejemplo de estanque con poca cantidad de materia orgánica. ....	76
<b>Figura 49.</b> Canales de a) drenaje y b) conducción de agua dentro de la “Finca Madre”. ....	79
<b>Figura 50.</b> Porcentaje de cada una de las pérdidas en la “Finca Madre” con respecto al total, para los meses de marzo, abril y mayo. ....	82
<b>Figura 51.</b> Porcentaje de agua usado y agua devuelta para los meses de estudio, partiendo del dato de 8 m <sup>3</sup> /s reportado por el SENARA. ....	82
<b>Figura 52.</b> Perfiles longitudinales del canal de la entrada principal, para diferentes días que se realizaron aforos a) mayo b) junio y c) julio (el 0 corresponde a la superficie del agua). ....	84
<b>Figura 53.</b> Curvas de descarga con su respectiva ecuación para el método de la sección a) media y b) intermedia. ....	86

<b>Figura 54.</b> Perfiles longitudinales del canal de la entrada principal, para diferentes días que se realizaron aforos a) entrada compuerta III Etapa, b) salida compuerta hacia río Cañas directa, c) salida compuerta hacia río Cañas CD9-2 y d) salida compuerta Santa Paula. ....	89
<b>Figura 55.</b> Zona de la compuerta CD9-2 la cual no se pudo medir la velocidad del agua. ....	90

### Índice de cuadros

<b>Cuadro 1.</b> Mediciones de velocidad según la altura de la vertical. ....	24
<b>Cuadro 2.</b> Consumos de corriente eléctrica de los componentes electrónicos. ....	38
<b>Cuadro 3.</b> Lecturas hechas con el sensor y aguja en el laboratorio y diferencia entre ellas. ....	53
<b>Cuadro 4.</b> Hallazgos en el uso de sensores ultrasónicos de bajo costo en la medición de tirante de agua en canales y ríos. ....	60
<b>Cuadro 5.</b> Costos del sensor. ....	67
<b>Cuadro 6.</b> Área reportada y medida de estanques en la “Finca Madre”. ....	68
<b>Cuadro 7.</b> Evapotranspiración promedio y desviación estándar, según los datos registrados por la estación meteorológica ubicada en la Finca Madre del 2021 al 2023. ....	69
<b>Cuadro 8.</b> Evaporación en los estanques promedio y desviación estándar de los estanques, según los datos registrados por la estación meteorológica ubicada en la Finca Madre del 2021 al 2023. ..	69
<b>Cuadro 9.</b> Volumen de agua perdido para los meses de marzo, abril y mayo para los dos casos debido a la evaporación de los estanques. ....	70
<b>Cuadro 10.</b> Calicatas más cercanas elaboradas por el CIA (2020) cercanas a la zona de estudio. ..	73
<b>Cuadro 11.</b> Coeficiente de permeabilidad promedio en los estanques que se les realizó la prueba de Porchet. ....	73
<b>Cuadro 12.</b> División de estanques y pérdidas por infiltración en cada división. ....	74
<b>Cuadro 13.</b> Infiltración y evaporación reportado en estudios sobre balances hídricos en estanques acuícolas. ....	77
<b>Cuadro 14.</b> Medición de ancho y altura de canales dentro de la “Finca Madre”. ....	78
<b>Cuadro 15.</b> Categorías de canales y su altura promedio. ....	79
<b>Cuadro 16.</b> Pérdidas en los canales de conducción y drenaje en la “Finca Madre”. ....	80
<b>Cuadro 17.</b> Volumen de agua de entrada y pérdidas en toda la “Finca Madre”, para los meses de marzo, abril y mayo. ....	81
<b>Cuadro 18.</b> Caudal obtenido mediante el método de la sección intermedia y media en la entrada principal de la "Finca Madre" para diferentes aforos, y su respectivo nivel del agua. ....	85
<b>Cuadro 19.</b> Balance hídrico considerando las entradas y las salidas dentro de la zona de estudio. ..	87
<b>Cuadro 20.</b> Balance hídrico considerando las entradas y las pérdidas dentro de la finca. ....	89
<b>Cuadro 22.</b> Recomendaciones para dividir un canal en secciones dependiendo del largo. ....	143
<b>Cuadro 23.</b> Error relativo al escoger un número determinado de verticales para un río ancho con un perfil transversal irregular. ....	143
<b>Cuadro 24.</b> Número de verticales recomendadas en canales artificiales con perfil transversal bien definido y regular, para asegurar un nivel de incertidumbre menor al $\pm 4\%$ (nivel de confianza del 95%). ....	143

## Índice de anexos

<b>Anexo 1.</b> Código para la programación del sensor en el laboratorio de hidráulica en el INII de la Universidad de Costa Rica. ....	102
<b>Anexo 2.</b> Código para la programación del sensor en las pruebas de campo, conectado a Arduino IoT. ....	104
<b>Anexo 3.</b> Código del sensor usado para la programación del prototipo del sensor y su montaje en físico. ....	107
<b>Anexo 4.</b> Datos meteorológicos para los meses de marzo, abril y mayo para el año 2021, obtenidos de la estación meteorológica propiedad de Aquacorporación Internacional. ....	110
<b>Anexo 5.</b> Datos meteorológicos para los meses de marzo, abril y mayo para el año 2022, obtenidos de la estación meteorológica propiedad de Aquacorporación Internacional. ....	110
<b>Anexo 6.</b> Datos meteorológicos para los meses de marzo, abril y mayo para el año 2023, obtenidos de la estación meteorológica propiedad de Aquacorporación Internacional. ....	111
<b>Anexo 7.</b> Coordenadas geográficas de Aquacorporación Internacional S.A. ....	111
<b>Anexo 8.</b> Brillo solar en el Ingenio Taboga (zona más cercana a la zona de estudio). Modificado de IMN (2013). ....	111
<b>Anexo 9.</b> Gráfico de normalidad de los datos de infiltración. ....	112
<b>Anexo 10.</b> Prueba de normalidad de Shapiro-Wilks. ....	112
<b>Anexo 11.</b> Prueba de Shapiro-Wilks para los datos de infiltración, realizado en el programa Infostat. ....	113
<b>Anexo 12.</b> Medidas de los lados de los estanques 71, 60, 73 y 63. ....	113
<b>Anexo 13.</b> Croquis de los estanques a los que se les tomó la medida de sus lados a) estanque 71, b) estanque 60, c) estanque 63 y d) estanque 73, dibujos no a escala. ....	114
<b>Anexo 14.</b> Largos y anchos promedios de los estanques 71, 60, 73 y 63. ....	114
<b>Anexo 15.</b> Áreas reportadas de los estanques en la Finca Madre. ....	115
<b>Anexo 16.</b> Datos para calcular el volumen de agua perdido en los estanques acuícolas para los meses de marzo, abril y mayo. ....	117
<b>Anexo 17.</b> Datos para el cálculo del coeficiente de permeabilidad del estanque 520. ....	117
<b>Anexo 18.</b> Datos para el cálculo del coeficiente de permeabilidad del estanque 60. ....	118
<b>Anexo 19.</b> Datos para el cálculo del coeficiente de permeabilidad del estanque 535. ....	119
<b>Anexo 20.</b> Datos para el cálculo del coeficiente de permeabilidad del estanque 176. ....	120
<b>Anexo 21.</b> Datos para el cálculo del coeficiente de permeabilidad del estanque 526. ....	121
<b>Anexo 22.</b> Datos para el cálculo del coeficiente de permeabilidad del estanque 160. ....	122
<b>Anexo 23.</b> Datos para el cálculo del coeficiente de permeabilidad del estanque 525. ....	123
<b>Anexo 24.</b> Datos para el cálculo del coeficiente de permeabilidad del estanque 34. ....	124
<b>Anexo 25.</b> Datos para el cálculo del coeficiente de permeabilidad del estanque 94. ....	125
<b>Anexo 26.</b> Datos para el cálculo del coeficiente de permeabilidad del estanque 167. ....	126
<b>Anexo 27.</b> Datos de infiltración para cada estanque y sus respectivas tres repeticiones. ....	127
<b>Anexo 28.</b> Datos para el cálculo de las pérdidas por infiltración en los canales. ....	128
<b>Anexo 29.</b> Datos para el cálculo de las pérdidas por evaporación en los canales. ....	131
<b>Anexo 30.</b> Memoria de cálculo de la medición 1 (M1) de caudal. ....	134
<b>Anexo 31.</b> Memoria de cálculo de la medición 2 (M2) de caudal. ....	135
<b>Anexo 32.</b> Memoria de cálculo de la medición 3 (M3) de caudal. ....	136
<b>Anexo 33.</b> Memoria de cálculo de la medición 4 (M4) de caudal. ....	137

<b>Anexo 34.</b> Memoria de cálculo de la medición 5 (M5) de caudal. ....	138
<b>Anexo 35.</b> Memoria de cálculo de la medición 6 (M6) de caudal. ....	139
<b>Anexo 36.</b> Memoria de cálculo de la medición 7 (M7) de caudal. ....	140
<b>Anexo 37.</b> Memoria de cálculo caudal de la entrada de la compuerta III Etapa.....	141
<b>Anexo 38.</b> Memoria de cálculo caudal de la salida compuerta hacia río Cañas directa. ....	141
<b>Anexo 39.</b> Memoria de cálculo caudal de la salida compuerta Santa Paula. ....	142
<b>Anexo 40.</b> Memoria de cálculo caudal de salida compuerta hacia río Cañas CD9-2. ....	142

### **Índice de anexos teóricos**

<b>Anexo teórico 1.</b> Número de divisiones para la toma de verticales.....	142
<b>Anexo teórico 2.</b> Uso de instrumentos para la medición de velocidad y observaciones en campo.....	144
<b>Anexo teórico 3.</b> Curvas de descarga .....	144
<b>Anexo teórico 4.</b> Memoria de cálculo consumo de energía.....	145

# 1.INTRODUCCIÓN

## 1.1. *Importancia y justificación*

Según datos de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO por sus siglas en inglés] (2021), se está llevando al límite productivo los sistemas de tierras, suelos y aguas en el planeta, a esto se le suma el efecto del cambio climático, ocasionando limitaciones en la producción de secano y regadío. El balance hídrico a nivel mundial está bajo presión, se está acelerando la escasez y la contaminación del agua dulce, por ejemplo, en el Medio Oriente y África Septentrional se presentan ya altos niveles de estrés hídrico (>50%). Se estima que el recurso hídrico proveniente de los ríos y acuíferos ronda alrededor a los 44 000 km<sup>3</sup>/año, y para 2020 fueron extraídos 4000 km<sup>3</sup>/año lo que representa casi el 10% de estos recursos.

Se espera que la población crezca más de un 20% para 2050 (Organización de las Naciones Unidas [ONU], 2021), para este mismo año se prevé que se requerirá incrementar un 70% la producción alimentaria a nivel mundial (FAO, 2010). La acuicultura y la pesca aseguran el sustento de vida y la seguridad alimentaria de alrededor de 500 millones de personas en todo el mundo. Sin embargo, la disponibilidad de recursos pesqueros se ha desestabilizado debido a la sobreexplotación y mala gestión costera, la pesca ilegal y la contaminación de las aguas. Por esta razón, la acuicultura se posiciona como una oportunidad de asegurar la seguridad alimentaria y reducir la pobreza (Fondo Internacional de Desarrollo Agrícola [IFAD por sus siglas en inglés], 2022).

Se define acuicultura como la cría y producción de peces, crustáceos, moluscos y plantas acuáticas en cautiverios. Se han desarrollado diferentes técnicas para lograr este cometido, las cuales se han implementado de acuerdo a ambientes y condiciones climáticas específicas. Existen cuatro categorías de acuicultura las cuales son los sistemas de aguas abiertas, cultivo en estanques, canales de flujo continuo y los sistemas de recirculación acuícola (RAS, por sus siglas en inglés) (Somerville et al., 2014).

Entre las ventajas que presentan los sistemas acuícolas, está el potencial de reducir la huella que dejan los sistemas de producción de animales terrestres, para suplir a los seres humanos de proteína (Somerville et al., 2014). Para 2018, la acuicultura continental produjo un 62,5% del total de pescado comestible cultivado, lo que equivale 51,3 millones de toneladas, aumentando su producción en un 4,6% en comparación al año 2000 (FAO, 2020).

Se estima que a nivel mundial 2 250 km<sup>3</sup>/año de efluentes son vertidos al medio ambiente, de los cuales 1 260 km<sup>3</sup>/año llegan en forma de drenaje de tierra agrícolas. Estos efluentes llevan consigo niveles altos de nitrógeno, fósforo y salinidad, y bajos niveles de oxígeno (FAO, 2021). En la producción acuícola en estanques se tiene muy poco control del agua descargada al medio ambiente, lo que ocasiona mala calidad de agua, debido a los desechos vertidos y organismos patógenos presentes en la misma (Tidwell, 2012).

Por otra parte, debido al aumento de la población y el cambio climático, la competencia por el uso del agua se incrementará, principalmente en la agricultura. Para 2022, un 70% del agua dulce consumida se utilizó en labores agrícolas (Banco Mundial, 2022). A principios del siglo XXI se realizaron estimaciones que se necesita aumentar el consumo del agua en un más de un 100% para 2050, para suplir la demanda de alimentos lo que equivale a que se consuman más de 2/3 del agua dulce disponible (Verdegem & Bosma, 2009). Desde otro punto de vista, se estima que se

tenga que reasignar entre un 25 al 40% del agua dulce de actividades de menor productividad hacia mayores, principalmente en regiones con gran estrés hídrico (Banco Mundial, 2022).

Conocer la cantidad de agua requerida en prácticas acuícolas es de suma importancia ya que permite conocer el volumen necesario de agua en los estanques y el flujo de agua que pasa por las instalaciones de producción (Sharma et al., 2013). La medición de la calidad del agua permite tener un buen esquema de gestión, por ejemplo, conocer datos para evaluar el impacto de una instalación acuícola en el suministro de aguas locales. En muchos países y normativas los efluentes de los estanques son vistos como contaminantes por lo que se necesita tener un registro de los efluentes que salen de los estanques. Por otro lado, conocer el agua requerida permite estimar el costo de agua, permite la planificación de actividades de conservación del agua o brindar datos si se puede expandir la producción acuícola (Yoo & Boyd, 1994).

Según el Servicio Nacional de Aguas Subterráneas, Riego y Avenamiento [SENARA] (2020), en el Distrito de Riego Arenal Tempisque (DRAT) se destinan tan solo 2,38% del área total del sistema de riego a la producción acuícola. Sin embargo, esta actividad genera 60 millones de dólares lo que equivale a un 42% del total de ingresos en la zona. Además, de darle empleo a aproximadamente 1.000 personas de forma directa y a su vez, contribuir a la reducción de la migración de la población de los cantones de Cañas y Bagaces, por negocios vinculados directa e indirectamente a la producción agropecuaria.

La acuicultura continental aumentó de un 1,9% de 2017 a 2018 (FAO, 2020), esto se debe, al papel que juega la misma para satisfacer la demanda de productos pesqueros a nivel mundial y asegurar la seguridad alimentaria. Razón por la cual, se deben buscar prácticas acuícolas que garanticen la sostenibilidad y el uso eficiente de los recursos. Por ende, se necesitan de herramientas tecnológicas que faciliten y mejoren la producción en esta área y garanticen una buena gestión ambiental.

## ***1.2. Delimitación del problema***

La acuicultura por medio de estanques acuícolas posee un mayor efecto en la hidrología local que otros tipos de acuicultura. Entre los tipos de estanques acuícolas se encuentran los excavados que usualmente su fondo se encuentra por debajo del nivel freático y se les suministra ya sea por infiltración o escorrentía. Estos son más pequeños que otros tipos de estanques como los estanques de terraplén, debido a los costos de excavación de grandes volúmenes de tierra (Boyd, 2020).

Entre las principales pérdidas de agua que puede haber en un estanque acuícola, se encuentran las pérdidas por infiltración y evaporación. Por esta razón, se deben tomar medidas para prevenirla, por ejemplo, construir los estanques en suelos arcillosos y no en suelos con mucha grava o arena, además, de compactar capas de suelos finos, ayudan a prevenir la infiltración (Boyd, 2020). En algunas ocasiones la infiltración del agua de los estanques acuícolas puede llegar a acuíferos, contaminando con residuos de pesticidas, materia orgánica o metales el manto. Aunque el uso de agroquímicos es bajo comparado con otras actividades agrícolas, la excreta de los animales o el alimento que se le brinda a estos últimos, ocasiona que el agua de los estanques acuícolas sea en rica en nutrientes como fósforo y nitrógeno (Verdegem & Bosma, 2009).

Los sistemas acuícolas, deben procurar garantizar la salud y el buen crecimiento de los peces, por esto, se debe considerar el estado del agua y su calidad, calidades bajas pueden ocasionar problemas en el crecimiento, aumentar la tasa de mortalidad y ocasionar disfunciones fisiológicas



(Yavuzcan Yildiz et al., 2017). Se considera la cantidad de oxígeno disuelto (DO, por sus siglas en inglés) en el agua, como el parámetro más importante a controlar en los estanques acuícolas, ya que funciona como un indicador general del bienestar de los peces, este influye en la alimentación, crecimiento y metabolismo de estos últimos.

Se ha encontrado que un incremento en la temperatura reduce la cantidad de DO en el agua y las fluctuaciones de este parámetro pueden ser por la fotosíntesis de las algas y la respiración de los peces (Li et al., 2018). En la explotación acuícola se debe considerar la especie de pez para la producción, se recomienda aquellas con alta tolerancia a los cambios de pH y temperatura. La tilapia es la especie más popular debido a su gran tolerancia al pH y a altas cantidades de amonio en el agua (Yavuzcan Yildiz et al., 2017) y a la vez, puede soportar concentraciones de DO de hasta 0,1-0,5 mg/L (Li et al., 2018).

Los estanques acuícolas, contienen grandes concentraciones de nitrógeno y fósforo debido a la incorporación de alimento, esto puede ocasionar un acelerado crecimiento de algas y plantas debido a la gran cantidad de nutrientes. Este fenómeno se conoce como eutrofización, la cual ocasiona floraciones de fitoplancton que aumenta la turbidez del agua y el pH. Además, se crean zonas de anoxia (aquellas donde el oxígeno está agotado) o hipoxia (bajas concentraciones de oxígeno), ocasionando que los niveles de DO bajen produciendo la muerte de peces (Chislok, 2013).

El uso de tecnologías y herramientas con base en las Tecnologías de la Información y la Comunicación (TIC) ha propiciado el desarrollo de la agricultura inteligente la cual usa la Internet de las Cosas (IoT, por sus siglas en inglés), los sistemas de teledetección, el uso del aprendizaje automático, las computadoras y las redes inalámbricas para el desarrollo de la agricultura (Trendov et al., 2009). Una problemática que se tiene en el uso de la tecnología en la agricultura es la elevación de costos y la poca alfabetización que se tiene en el uso de la electrónica (Trendov et al., 2009).

Las placas de desarrollo como los Arduinos, se presentan como una alternativa tecnológica, poseen las ventajas que incluye tanto hardware y software a un precio accesible. Estos se enfocan tanto para personas expertas como inexpertas, y existen cientos de códigos y foros para aprender a utilizar esta herramienta, y aprender los principios básicos de programación y electrónica (D'Ausilio, 2012). Por ejemplo, se ha utilizado el uso de Arduino y sensores ultrasónicos para monitorear el nivel del agua en reservorios, donde se presenta poco turbulencia en el agua (Rodrigues et al., 2022).

La empresa Acuacorporación Internacional S.A., fue fundada en los años ochenta y se posiciona como el mayor productor de tilapia en el país. Con el fin de mejorar su competitividad en los mercados internacionales, posee diversas certificaciones como la BAP, ASC (Aquaculture Stewardship Council), entre otras. Debido a que estas últimas, cada vez son más exigentes y preparándose para los requerimientos del futuro, se desea tener un control más riguroso de las variables que afectan la producción de tilapia. Por esta razón, la empresa desea saber cuánto es el caudal de agua que está entrando a la finca principal, ya que el dato suministrado por el SENARA es un dato en bruto, que puede no reflejar la realidad. Además, de conocer el caudal de agua que se devuelve al DRAT, para asociar el volumen de agua devuelto con los parámetros de calidad del agua. Por otra parte, la empresa quiere empezar a incursionar en el uso de IoT para automatizar y mejorar sus procesos.

En este estudio, se realizó un balance hídrico en la “Finca Madre” de la empresa anteriormente

citada, la cual tiene un área aproximada de 20 Ha, con el fin de conocer los volúmenes de agua que entran a la empresa y se están devolviendo al canal sur del DRAT. Para realizar este balance se realizaron mediciones de la infiltración y evaporación que poseen tanto los estanques acuícolas como de los canales de riego que pasan por la empresa. Además, mediante el uso de Arduino se diseñó un sensor que permita monitorear el caudal de entrada y que este se pueda conectar a Internet, lo cual puede ayudar a la empresa a tener un monitoreo a tiempo real de este parámetro.

## **2.OBJETIVOS**

### ***2.1. Objetivo General***

-Realizar el balance hídrico en los estanques acuícolas de la “Finca Madre” de la empresa Aquacorporación Internacional S.A., mediante el monitoreo del caudal de entrada por medio de sensores y la medición de las pérdidas debidas a la producción de tilapia (*Oreochromis niloticus*), para calcular el efluente que se devuelve al DRAT.

### ***2.2. Objetivos Específicos***

-Diseñar, armar y calibrar un sistema de medición del tirante de la lámina de agua mediante el uso de un sensor ultrasónico para determinar el caudal de agua en el canal de entrada de la finca Madre.

-Realizar el cálculo del balance hídrico dentro de la zona de estudio considerando el caudal de agua de entrada y las pérdidas debidas a la infiltración y evaporación en los estanques, para estimar el caudal de salida que se devuelve al DRAT.

## **3. MARCO TEÓRICO**

### ***3.1. Estanques acuícolas***

#### ***3.1.1. Antecedentes en balances hídricos en estanques acuícolas***

Los estudios realizados sobre balances hídricos en estanques acuícolas, han tenido como fin de conocer la cantidad mínima de agua para producir 1 kg de pescado y mejorar la eficiencia de producción. Sharma et al. (2013), encontraron que se necesita 10,3 m<sup>3</sup> de agua/kg para la producción de carpa en modalidad semi-intensiva. Para esto se realizó un balance hídrico en donde se consideró la evaporación, la infiltración y la precipitación en la zona de estudio. Las pérdidas de agua en el sitio de estudio se debieron principalmente por la evaporación y la infiltración. Por último, se encontró que al cambiar la modalidad a sistemas intensivos se puede reducir considerablemente la cantidad de agua necesitada en los estanques, ya que habrá más densidad de peces por m<sup>3</sup> de agua.

Adhikari et al. (2016), realizaron un balance hídrico considerando las ganancias de agua (precipitación) y pérdidas (infiltración y evaporación). Estos llegaron a la misma conclusión que Sharma et al. (2013), al cambiar la modalidad productiva se reducirá el agua consumida y los impactos negativos al medio ambiente. Por su parte, encontraron que se necesitan entre 5,16 a 5,66 m<sup>3</sup> de agua/kg para la producción de pescado.

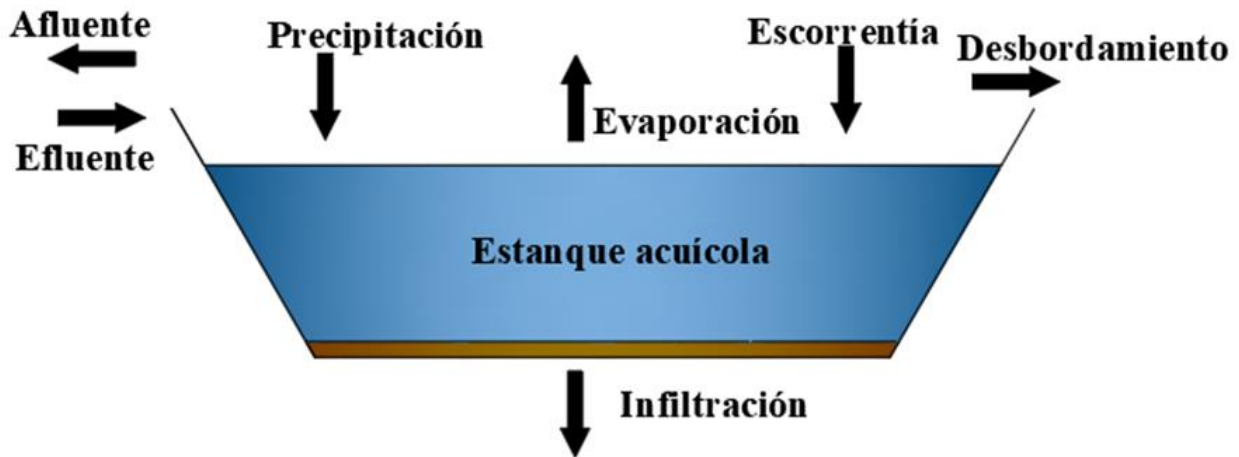
### 3.1.2. Hidrología en estanques acuícolas

El balance hídrico en estanques acuícolas (figura 1) se obtiene mediante la ecuación 1. Se ha encontrado que las mayores pérdidas en los estanques acuícolas se deben por la infiltración y la evaporación del agua (Boyd & Gross, 2000). El uso de un balance hídrico sirve para evaluar el impacto ambiental de los efluentes, además para saber la probabilidad de recambio y descarga en un estanque acuícola (Nath & Bolte, 1998).

$$P + I = E + S_o + OF + D \pm \Delta V \quad (1)$$

Donde:

P: precipitación (mm), I: entrada de agua regulada (mm), E: evaporación (mm), So: infiltración (mm), OF: desbordamiento de agua (mm), D: salida de agua regulada (mm) y  $\Delta V$ : cambio en el volumen (mm).



**Figura 1.** Balance hídrico en un estanque acuícola.  
Fuente: adaptado de Nath & Bolte (1998).

### 3.1.3. Infiltración

Las pérdidas por infiltración en un estanque acuícola en tierra se dan de dos maneras: verticalmente hacia el fondo y horizontalmente a través de los diques. Si el estanque está bien construido, la infiltración horizontal se considera insignificante (FAO, 2006). Se recomienda que la infiltración sea menor a 5 o 6 mm por día, ya que indica que los estanques fueron bien construidos. Se categoriza la infiltración en estanques acuícolas en baja (0-5 mm/d), moderada (5-10 mm/d), alta (10-15 mm/d) y extrema (>15 mm/d) (Boyd & Gross, 2000).

En estanques acuícolas las pérdidas por infiltración dependen principalmente de la porosidad del suelo, el mantenimiento y los métodos de construcción de los estanques y los cambios estructurales que han ocurrido a lo largo del tiempo en la cuenca del estanque (Bath & Bolte, 1998).

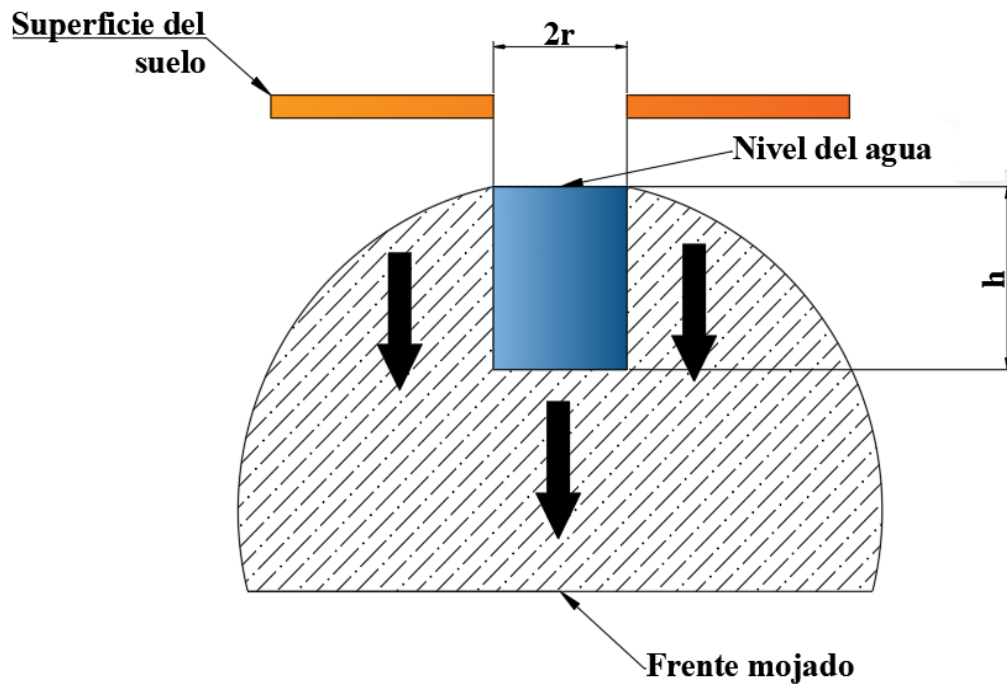
### 3.1.3.1. Coeficiente de permeabilidad

Determina la velocidad de filtración del agua de un medio saturado (agua), esto cuando el gradiente de energía o hidráulico sea igual a uno. Es el factor “k” que se tiene en la ecuación de la ley de Darcy y en otras palabras representa con qué facilidad el suelo dejar pasar el agua a través de él, en una unidad de área transversal a la dirección del flujo (Leitón, 1985).

### 3.1.3.2. Métodos de medición de infiltración

#### 3.1.3.2.1. Método de Porchet

Es un método que consiste en excavar un agujero en el suelo de radio “r”, el cual se llena con agua hasta que el suelo de las paredes y el fondo se encuentren casi en su totalidad saturado y la infiltración ocurre en estas dos secciones, tal como se observa en la figura 2. Esto ocasiona que la tasa de infiltración “v” se mantenga relativamente constante. Por tanto, la infiltración total en el agujero es igual a:  $v \times A$  (A es el área superficial del agujero) y se tiene que  $v = k$ , por lo que  $Q = k \times A$ . Este método también es conocido en la literatura inglesa como “*inversed auger-hole method*” (Ritzema, 1994).



**Figura 2.** Método de Porchet para medir la infiltración del agua en el suelo.

Fuente: adaptado de Ritzema (1994).

Según Macías et al. (2018), la Dirección de Investigación y Gestión Hídrica (DIGH) del SENARA publicó especificaciones técnicas para el uso de la prueba de Porchet en Costa Rica. Entre las que se encuentran que el agujero excavado debe ser de 0,40 m de profundidad y 0,20 m de diámetro, además que la duración de la prueba debe ser mínimo de 60 minutos y que el suelo debe estar saturado por

lo menos 2 horas antes previas al ensayo. Por último, Alvarado & Barahona (2017), encontraron que los resultados obtenidos por el método de Porchet pese a ser mayores en comparación a los métodos de doble anillo y Guelph, no se encuentran tan alejados de estos últimos. Esto se suma a las ventajas que tiene de ser un método fácil y rápido de implementar. Además, los autores recalcan el hecho de que, para tener buenos resultados en una prueba de infiltración, el suelo debe de encontrarse saturado.

### ***3.1.3.3. Métodos para controlar la infiltración***

En primera instancia se recomienda construir los estanques acuícolas en suelos arcillosos, si se tiene suelos arenosos se pueden instalar una capa de suelo arcilloso en el fondo del estanque. Por otro lado, la incorporación de materia orgánica tal como excremento de animales como la cuita de gallina o residuos vegetales (Boyd & Gross, 2000).

Otras opciones para reducir la infiltración es el uso de agentes químicos dispersantes como cloruro de sodio, carbonato de sodio, pirofosfato de tetrasodio y tripolifosfato de sodio que se mezclan con el suelo y luego se vuelve a compactar. También, se tiene el uso de revestimientos de plástico como membranas que pueden durar años, sin embargo, los costos pueden ser elevados (Boyd, 2019).

### ***3.1.4. Evaporación***

Es un proceso del ciclo hidrológico, donde el agua en estado líquido se convierte en vapor de agua, y posteriormente se retira de la superficie evaporante, se da en diversidad de superficies como: estanques, lagos, vegetación mojada, ríos y océanos (Allen et al., 2006).

#### ***3.1.4.1. Evaporación en cuerpos de agua estáticos***

La cantidad de agua perdida por evaporación depende de las condiciones locales climáticas, esta se ve influenciada por la temperatura, la humedad, la velocidad del viento y la radiación solar. Por otra parte, una disminución de la misma se debe a bajas temperaturas del aire, alta humedad, lluvia y gran cantidad de nubes en la zona (FAO, 2006). Se encontró que se puede estimar con resultados confiables la tasa de evaporación de un cuerpo de agua estático, al multiplicar la evaporación de una evaporímetro clase A por un factor entre 0,60 a 0,81, de los cuales se recomienda uno de 0,7. Boyd (1985) encontró que, para el caso de estanques acuícolas, este factor es de 0,81.

#### ***3.1.4.2. Métodos para controlar la evaporación***

Se debe priorizar el uso de barreras (vivas o muertas) para prevenir el movimiento de las moléculas del agua de la superficie del estanque hacia la atmósfera o reducir la cantidad de radiación solar que golpea el estanque. Otra alternativa es controlar las malezas acuáticas ya sea de forma biológica, mecánica o química para reducir las pérdidas por transpiración (Boyd & Gross, 2000).

#### ***3.1.4.3. Evaporímetro clase A***

Es un tanque circular de 120,7 cm de diámetro y 25 cm de profundidad que se utiliza para medir la  $ET_0$  y construido ya sea de hierro galvanizado o metal. Cuando se trabaja con este tipo de tanque se debe hacer toma de las lecturas temprano en la mañana cuando se realizan las lecturas de precipitación(Allen et al., 2006).

### 3.1.4.4. Evaporación y evapotranspiración en Costa Rica

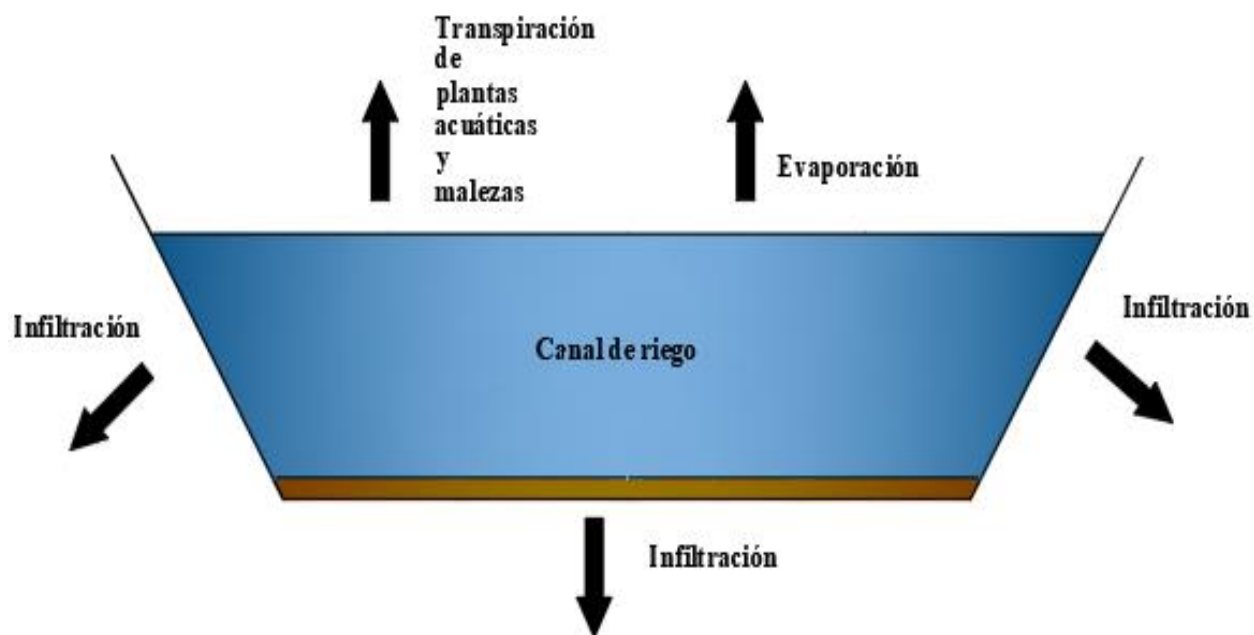
Se debe recordar que la evapotranspiración de un lugar bien regado puede exceder la evaporación de una superficie de agua bajo las mismas condiciones climáticas (Yoo & Boyd, 1994). Hernández (2014) encontró que la evaporación en el Pacífico Norte de Costa Rica, tiene un promedio de 7,6 mm/día, además, determinó que el error que lleva calcular la evaporación bajo la ecuación de Penman-Monteith, y en la misma zona de estudio que este estudio es menor al 10% entre los meses de febrero y mayo.

### 3.1.5. Evapotranspiración

Se refiere a la transpiración y evaporación que ocurren simultáneamente. Donde la transpiración corresponde al proceso donde el agua en estado líquido de los tejidos de las plantas se convierte en vapor, y luego se remueve hacia la atmósfera (Allen et al., 2006).

### 3.2. Pérdidas en canales abiertos

En canales sin revestir existen tres tipos de pérdidas de agua por infiltración, evaporación y transpiración de plantas (figura 3) (Sameh et al., 2023). Las pérdidas por evaporación corresponden entre 1 a 2%, mientras que por infiltración del 5 al 40% del total del 100% del agua que pasa por un canal sin revestir (FAO, 2006). Se calcula que entre el 40-45% del agua que pasa por un canal es pérdida antes de llegar a su destino final. Aunque, la pérdidas por evaporación son menores que las de por infiltración se deben de considerar si la zona presenta altas temperaturas. Por otra parte, se ha encontrado que las pérdidas por transpiración son menores al 1% del total por pérdidas de agua en un canal (Sameh et al., 2023).



**Figura 3.** Pérdidas de agua en un canal no revestido. Fuente: adaptado de Sameh et al. (2023).

### 3.2.1. Infiltración en canales abiertos no revestidos

La infiltración en canales abiertos se debe principalmente a la textura del suelo. Se han desarrollado diversas fórmulas empíricas para calcular esta pérdida, entre ellas la fórmula de Moritz (ecuación 2) y la fórmula de Molesworth y Yennidunia (ecuación 3). Se encontró que esta última fórmula da resultados satisfactorios a la hora de calcularla para suelos arcillosos (Shaikh & Lee, 2016).

$$S = 0,037 * C * \frac{Q}{V} \quad (2)$$

Donde:

S: infiltración en el canal ( $m^3/s \cdot km$ ), C: descarga (m), V: velocidad de flujo (m/s), C: constante que depende del tipo de suelos (0,0022 para suelos franco arcillosos, 0,0015 arcilloso, 0,0018 limo arcilloso, 0,003 franco arenoso y 0,0026 franco limoso).

$$S = C * \sqrt{P} * \sqrt{A} \quad (3)$$

Donde:

S: infiltración en el canal ( $m^3/s \cdot km$ ), P: perímetro mojado (m), A: área mojada del canal ( $m^2$ ), C: constante que depende del tipo de suelos (0,0015 para suelos arcillosos y 0,0022 para suelos franco arcillosos).

### 3.3 Métodos de medición de caudal

Cuando se quiere medir caudal existen métodos de medición de una sola vez (*single measurements methods*, en inglés) por ejemplo: el método de velocidad y área transversal y los métodos de medición continua (*continuos measurements methods*, en inglés) por ejemplo: las curvas de descarga y las estructuras hidráulicas para medición de caudal). Los métodos de una sola vez se llevan a cabo ocasionalmente o por muy pocos periodos de tiempo y sirven a menudo para calibrar los métodos de medición continua (Boyten, 2005).

#### 3.3.1. Método por velocidad y sección transversal

Consiste en medir la velocidad media de la corriente por medio de instrumentos como los caudalímetros o flotadores. Luego se multiplica la velocidad por la sección del área transversal del canal o río y se obtiene el caudal (FAO, 2006). Se recomienda utilizar este método para condiciones de flujo estacionario (Boyten, 2005).

Sin embargo, según la Oficina de Reclamación de los Estados Unidos (United States Bureau of Reclamation [USBR]) (2001), para usar el método por velocidad y área transversal, se debe medir la velocidad del agua en diferentes secciones del canal, utilizando la ecuación 4 y 5.

$$q_n = \bar{V}_n * a_n \quad (5)$$

$$Q = \sum_i^n \bar{V}_n * a_n \quad (6)$$

Donde:

Q: caudal total ( $m^3/s$ ),  $\bar{V}$ : velocidad media asociada a un área parcial “n” (m/s), q: flujo en una sección parcial “n” ( $m^3/s$ ) y a: área de una sección parcial del canal “n” ( $m^2$ ).

### 3.3.1.1. Método de la sección media (mean section method, en inglés)

En este método las velocidades y las profundidades para dos verticales sucesivas se promedian y el caudal en el segmento entre las verticales es el producto de los dos promedios (Herschey, 2009), en la ecuación 6 se muestra este método.

$$q_{n-n+1} = \left[ \frac{(\bar{V}_n + \bar{V}_{n+1})}{2} \right] * \left[ \frac{(D_n + D_{n+1})}{2} \right] * (L_{n+1} - L_n) \quad (6)$$

Donde:

q: flujo en una sección parcial (m<sup>3</sup>/s), L: distancia vertical desde el punto de origen de la estación (m) y D: profundidad del agua en la estación

En el caso de los extremos del canal o un banco de un río, la velocidad media tiende a tener una forma parabólica en la dirección horizontal hacia el extremo del canal o río (Herschey, 2009), en la ecuación 7, se muestra la forma de calcular el caudal en esta zona.

$$q_b = \frac{2}{3} \bar{V}_1 * \frac{1}{2} (D_0 + D_1) * L \quad (7)$$

Donde:

q<sub>b</sub>: flujo cercano al banco del canal o río (m<sup>3</sup>/s), L: distancia horizontal desde el punto de origen hasta la estación (m) y D<sub>0</sub> y D<sub>1</sub>: profundidades de las estaciones en el punto inicial y la consecutiva en el canal o río.

### 3.3.1.2. Método de la sección intermedia (mid section method, en inglés)

Según Turnipseed & Sauer (2010), se ha encontrado que este método es más simple de realizar y más preciso que otros métodos para la toma de áreas, se muestra en la ecuación 8.

$$q_n = \bar{V}_n * \left[ \frac{(L_n - L_{n-1}) + (L_{n+1} - L_n)}{2} \right] * D_n \quad (8)$$

Donde:

q: flujo en una sección parcial (m<sup>3</sup>/s), L: distancia horizontal desde el punto de origen hasta la estación (m) y D: profundidad del agua en la estación (Herschey, 2005).

En el caso de la estación inicial el caudal se calcula con la ecuación 11, mientras que el final del canal con la ecuación 10 (Herschey 2009).

$$q_{inicio} = \bar{V}_1 * \frac{1}{2} (D_0 + D_1) * L_1 \quad (9)$$

$$q_{final} = \bar{V}_n * \frac{1}{2} (D_n + D_{n-1}) * L_n \quad (10)$$

Donde:

q inicio y final: flujo en el inicio y final del canal o río (m<sup>3</sup>/s), L<sub>1</sub> y L<sub>n</sub>: distancia horizontal desde el punto de origen hasta la estación 1 y hasta la última estación “n” (m) y D: profundidad del agua en la estación (m).



### 3.3.2. Nivel del agua

Conocido en inglés como *stream gage, stage* o *gage height*, es la altura de la superficie del agua ya sea en metros o pies, debajo de una altitud establecida donde el nivel del agua es cero, este comúnmente es arbitrario, pero es cercano a la cama del río o canal. Normalmente, esta se mide en intervalos de 15 minutos, con diversos métodos tales como reglas graduadas o sensores ópticos, de presión o acústicos (USGS, 2018; Finney,s.f.).

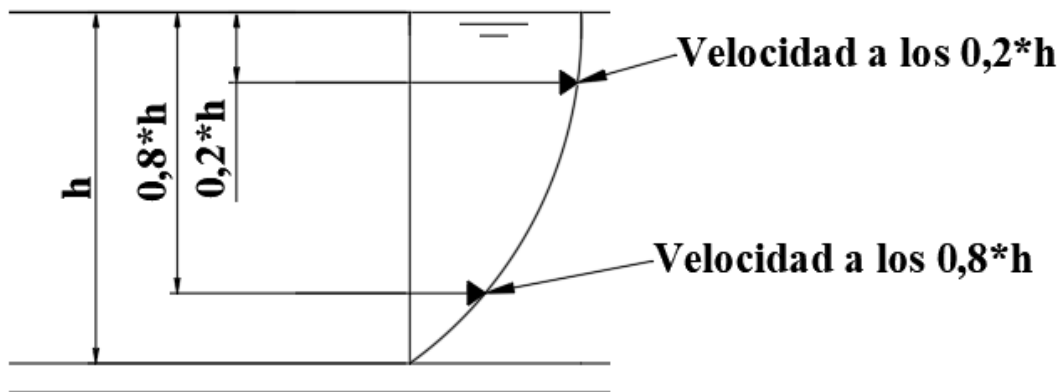
### 3.3.3. Nivel de referencia

Conocido en inglés como *datum*, el nivel de referencia es una elevación constante que puede ser tomada desde la altura del nivel del mar o desde un punto arbitrario. Por ejemplo, con un nivel de referencia arbitrario se eliminan números negativos a futuro por problemas de socavación (USGS, 2018; Finney,s.f.).

### 3.3.4. Medición de velocidad

#### 3.3.4.1. Método de los dos puntos

Este método es el utilizado cuando se realiza cálculos de caudal con el método de la sección intermedia, la experiencia de trabajo con este método ha demostrado ser consistente y exacto en comparación con muchos de los métodos para medir velocidad, a excepción de las curvas de velocidad con respecto a una vertical. Consiste en medir la velocidad a los 0,2 y a los 0,8 de la vertical con respecto a la superficie del agua (figura 4) y en la ecuación 11 se muestra la forma de calcular la velocidad con este método (Turnipseed & Sauer, 2010).



**Figura 4.** Método de los dos puntos.

$$\bar{v} = \frac{1}{2} (\bar{v}_{0,2} + \bar{v}_{0,8}) \quad (11)$$

Donde:

$\bar{v}$ : velocidad media asociada a un área parcial “n” (m/s),  $\bar{v}_{0,2}$ : velocidad a los 0,2 de profundidad (m/s) y  $\bar{v}_{0,8}$ : velocidad a los 0,8 de profundidad (m/s).

Por otra parte, Uribe (2019) en el cuadro 1, realiza algunas recomendaciones de las alturas para medir la velocidad cuando los canales son poco profundos.

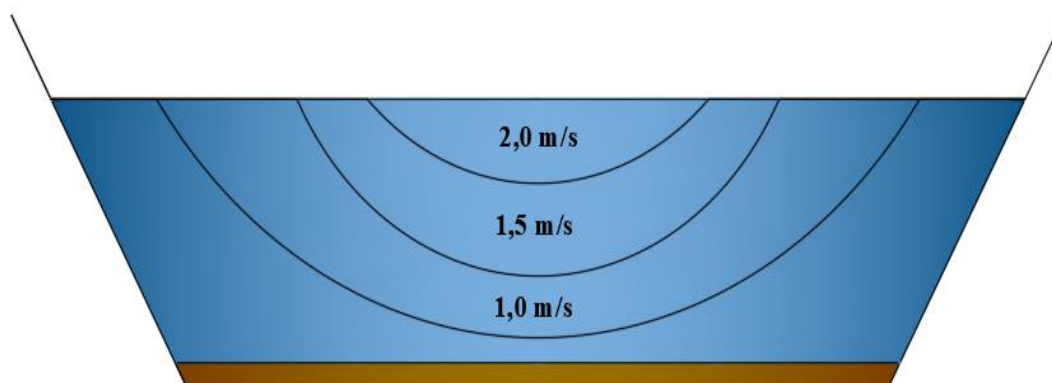
**Cuadro 1.** Mediciones de velocidad según la altura de la vertical.

Altura $h_i$ (m)	Medición de la velocidad en la subsección
$h < 0,2$ m	$0,6 \cdot h_i$ (método un punto)
$0,2 < h < 0,5$ m	$0,2 \cdot h_i$ ; $0,6 \cdot h_i$ (método dos puntos)
$h > 0,5$ m	$0,2 \cdot h_i$ ; $0,6 \cdot h_i$ ; $0,8 \cdot h_i$ (método tres puntos)

Fuente: adaptado de Uribe (2019).

### 3.3.4.2. Distribución de la velocidad en una sección transversal

En un canal o un río la velocidad no es la misma en todos sus puntos (figura 5), en el fondo y en los extremos está es más baja, mientras que en la superficie es mucho más rápida (Hudson, 1993). Por otro lado, la distribución de la vertical depende de la forma del canal o río, no es lo mismo un área transversal natural irregular de un río a el área de sección transversal de un canal trapezoidal (Herschy 2009).



**Figura 5.** Ejemplo de distribución de la velocidad en un canal transversal.

Fuente: adaptado de Hudson (1993).

### 3.3.5. Métodos de medición continua

#### 3.3.5.1. Método de medición de caudal por etapas (*stage discharge method*, en inglés)

En este método se establece una relación entre el nivel del agua y el caudal a través de algún método de medición de una sola vez, con esto se obtiene una curva. Los caudales luego son obtenidos a través de la medición del nivel del agua (Boyten, 2005).

### ***3.3.5.2. Medición a través de estructuras hidráulicas***

En este método los caudales son obtenidos a través de la medición del nivel del agua aguas arriba, el cual es continuamente medido a cierta distancia aguas arriba de la estructura (vertedero, compuerta, entre otros) (Boyten, 2005).

## ***3.4. Sensores ultrasónicos en superficies de agua***

### ***3.4.1. Antecedentes en el uso de sensores ultrasónicos en mediciones de tirantes de agua***

Se han realizado diversos estudios del uso de sensores ultrasónicos en particular el HC-S404 y la plataforma Arduino para medir el nivel del agua en ríos, reservorios, vertederos y canales. En los siguientes artículos se presenta una recopilación bibliográfica de los hallazgos encontrados.

#### ***3.4.1.1. Ríos***

Kato & Sinde (2015), diseñaron un sistema de monitoreo para identificar estados críticos en los ríos, mediante el uso de Arduino y sensores ultrasónicos en el río Kagera en el distrito de Ngara en Tanzania. Se construyó un prototipo en el cual se simuló el nivel de agua del río, variando la entrada de voltaje analógica del sensor ultrasónico HC-SR04. Con este se creó un sistema de monitoreo que enviará un mensaje de texto SMS cuando se tengan bajos niveles de agua (<6 m) y altos niveles de agua (>12 m). Se concluyó que este tipo de opción es una opción viable y económica, pero que se necesitan realizar pruebas en el lugar de estudio, para ver cómo afecta las variables ambientales al sensor.

Nasution et al. 2018, realizaron un prototipo para medir el caudal del agua en el río Juanda en Indonesia, el cual es un río con gran cantidad de sedimentos, mediante el uso de un sensor ultrasónico HC-SR04 para medir el nivel del agua y el uso de un sensor G3/4 para medir la velocidad del agua. El sensor se colocó en una tubería de plástico y la distancia entre el río y el sensor fue de 1,35 m. Se encontró que el sensor tiene una exactitud promedio del 96,6% al comparar la lectura del sensor con una lectura manual del nivel del río. Por último, se encontró un aumento de 3,00 cm en el nivel del agua, a una determinada hora. Este aumento pudo deberse a la presencia de objetos dentro del río, lo que puede contribuir a generar ruido en las mediciones.

Marina et al. (2018), realizaron un prototipo para medir el nivel del agua con el uso de Arduino y el sensor ultrasónico HC-SR04 en el Instituto de Investigación Científica de Kazajstán sobre Gestión del Agua, en este caso los datos se mandaban por medio de mensajería SMS. El sensor se colocó en tres estaciones de aforo en el distrito de Merki. Se encontró que las mediciones oficiales reportadas por los institutos de agua de este país, están sobreestimadas en un 4,9% en relación con las lecturas obtenidas con el sensor.

#### ***3.4.1.2. Canales***

Rodrigues et al. (2022), evaluaron el uso de cinco sensores ultrasónicos HC-SR04 y Arduino en un laboratorio de hidráulica, para demostrar si pueden usarse para medir el nivel del espejo de agua en canales abiertos. Se realizaron pruebas en regímenes transitorios y permanentes de caudal. Se concluyó, que los sensores ultrasónicos son herramientas adecuadas para medir el nivel del agua en canales bajos tirantes menores a 0,20 m, incluso para condiciones de gran turbulencia. Además, bajo condiciones mayores a 0,40 m, se tuvo una subestimación de 15%, lo que equivale a 0,0060 m. Por

lo que se concluyó que cuanto más mayor sea la distancia entre el nivel del agua y el sensor, aumenta la incertidumbre en las mediciones.

Se recalca la necesidad de calibrar este tipo de sensores para su uso con Arduino, ya que debido a sus bajos precios estos no son calibrados, y no se tiene un gran control de calidad en la manufactura. Además, permite identificar sensores con fallas, que no estén entre los rangos suministrados en la hoja de datos del sensor. Por otra parte, los autores recomiendan realizar pruebas en otro tipo de sensores de índole ultrasónica, y analizar los errores bajo distancias mayores a 0,20 m (Rodrigues et al., 2022).

Corapi et al. (2021), realizaron pruebas en un canal en el laboratorio de hidráulica de la Universidad de Guayaquil en Ecuador, para identificar el uso del sensor HC-SR04 para la medición del nivel del agua y un sensor de presión MPX 5500DP para determinar el caudal, y así crear curvas de descarga. Para la toma de mediciones el flujo debía ser permanente uniforme en el canal. Se encontró que la relación entre el tirante medido y el caudal de descarga tenía un  $r^2$  de 0,94. Fathur Rahman et al. (2017), realizaron un prototipo que consistía en el uso de un sensor ultrasónico a prueba de agua modelo JSN-SR04T en una tubería de hierro que posteriormente se introduciría en un canal abierto de 1 m de nivel del agua. Se encontró diferencias menores a 0,002 m entre las mediciones por el sensor y las observaciones visuales bajo condiciones de lluvia, por lo que lo hace una opción portátil bajo condiciones adversas de calor y lluvia.

Koshoeva et al. (2021), realizaron un prototipo para medir el caudal en un canal en el laboratorio de hidráulica de la Universidad Técnica de Kumasi en Kirguistán, por medio de la plataforma Arduino y un sensor de flujo por tuberías YF-S201 y un sensor ultrasónico HC-SR04. Se encontró que el prototipo da una diferencia en los resultados del 9% comparado con los valores reales, con lo que el prototipo da resultados satisfactorios para medir caudal y a un bajo costo.

#### **3.4.1.3. Vertederos**

Dusarlapudi et al. (2020), realizaron pruebas en un vertedero rectangular para la cosecha de lluvia (buscar luego esto en español), para verificar la precisión del sensor ultrasónico HC-SR04 para medir el nivel del agua a alturas de 2,00 cm, 2,50 cm y 3,00 cm. Se encontró que el sensor tiene una precisión entre el 96 al 98% y que a mayor sea la distancia entre el sensor y el nivel del agua mejores resultados se obtienen.

Mohammed et al. (2019) verificaron el uso de un sensor ultrasónico HC-SR04 y un microcontrolador PIC16F877A, en Iraq para la medición del volumen de un recipiente rectangular, mediante la medición de la altura del mismo. Las pruebas se realizaron en un cuarto a 15°C. Se encontró que el máximo error obtenido fue de 0,070 cm a para el nivel del agua y 0,000065 m<sup>3</sup> para el volumen, al comparar el nivel del agua con la medición de una regla. Además, se encontraron coeficientes de relación altos con un coeficiente de correlación de Spearman (SCC) de 0,997 y un coeficiente de correlación de Kendall (KCC) de 0,9951. Además, se encontró que la principal limitante del estudio es la temperatura, y seguido la distancia entre el sensor y el recipiente que empieza a degradarse la señal a distancias mayores de 3 m.

Gobatti et al. (2022), diseñaron un prototipo mediante el uso de un ESP82 y un sensor ultrasónico US-025 en la Universidad de São Paulo en Brasil, para medir el nivel del agua debido a la escorrentía que ocasiona la lluvia en dos tipos de techos, uno cubierto con vegetación y otro tejado. Para medir

la exactitud de los datos medidos por el sensor, se realizó un diseño que acopla este último con un vertedero triangular. Se comparó los datos por dos pluviómetros, uno incluido en una estación meteorológica de Davis Instruments y otro creado en el laboratorio de Ingeniería Hidráulica de esta universidad.

Se realizó una correlación entre el caudal de escorrentía con el vertedero y el sensor, y el caudal de lluvia en los pluviómetros, en el tejado techado, donde se asume que toda el agua que cae se convierte en escorrentía. Se obtuvo un  $r^2$  de 0,91 (evento con mayor cantidad de lluvia) y 0,62 bajo los eventos de máxima intensidad de lluvia, y se obtuvo  $r^2$  de 0,60 y 0,38 bajo los eventos con menor intensidad de lluvia. Los autores concluyen que se obtienen mejores resultados con el sensor cuando se tiene caudales de escorrentía mayores, y que los  $r^2$  menores pudieron ser afectados debido a que se midieron con el pluviómetro construido en el laboratorio el cual tiene menor precisión.

#### **3.4.1.4. Otros estudios**

Subekt

i et al. (2022), evaluaron la exactitud del sensor HC-SR04, midiendo el voltaje de salida del sensor cuando es puesto a diferentes distancias del nivel del agua. Se comparó los resultados obtenidos con una regla y se obtuvo una exactitud de 98,66% y una precisión del 98,38% en las mediciones reportadas con el sensor ultrasónico.

Buhion et al. (2022) diseñaron un prototipo para medir el nivel del agua, para enviar un mensaje SMS cuando exista peligro de inundación Manila, Indonesia, esto con el uso de Arduino MEGA y dos sensores ultrasónicos HC-SR04 y un URM07. El nivel del agua se midió con el URM07 cada 15 minutos, mientras que el sensor HC-SR04 se usaba con un zumbador para activar una alarma en el caso de detectar intrusos a una distancia de 0,60 m (2 pies). Los autores concluyen que se necesita iterar varias veces las lecturas del sensor, para que no se presentan lecturas erróneas. Además, que el sistema creado es eficiente en detectar riesgos de inundación, solo que se tiene que tener cuidado si se presenta mala cobertura GSM y la incertidumbre que pueda tener el sensor.

Galli et al. (2022), evaluaron el uso del sensor HY-SRF05 para detectar el avance del agua en un campo en Mantua, Italia cuando se regaba por gravedad. Se encontró que la lectura del sensor es consistente con lo que se esperaba, ya que la lectura se mantiene constante en la fase de encharcamiento o humedecimiento y la lectura empieza a disminuir cuando el agua empieza a infiltrarse. Por otra parte, los resultados encontrados en el laboratorio de hidráulica de la Universidad de Pavia indican que el sensor tiene un error menor al 6% al compararlo con sensores ultrasónicos marca PIL Sensoren GmbH usados en el laboratorio.

#### **3.4.2. Componentes electrónicos y herramientas informáticas**

##### **3.4.2.1. Placa de desarrollo: Arduino**

Es un microcontrolador de código abierto basado en software y hardware de fácil uso, estos mismos se utilizan en infinidad de funciones, como leer entradas (sensores, actuadores, botoneras) y transformarlo en salidas como activar una luz o encender un motor (Arduino, 2021). Existen cientos de tutoriales en la web para aprender lo básico de cómo programarlo, además de foros activos que permiten a los usuarios compartir sus proyectos y ayudar a otros en los suyos (Trendov et al., 2009).

### 3.4.2.2. ESP32

Es un SoC (*System on a Chip*), que permite conexión Wi-Fi y Bluetooth a una frecuencia de 2,4 GHz, tiene la ventaja que se puede programar bajo el entorno Arduino IDE (figura 6). Además, posee soporte para operaciones de comunicaciones (SPI, I2C, I2S) y potencia computacional (CPU y memoria interna). Trabaja baja potencia y permite entrar en modos de reducción de gastos de energía. Los ESP32 son más fácil de encontrar en forma de módulo, ya que posee la ventaja de tener terminales listas para soldar y está empaquetado en un “shield” metálico (Bertoletti, 2019).



**Figura 6.** ESP32-WROOM-32U.

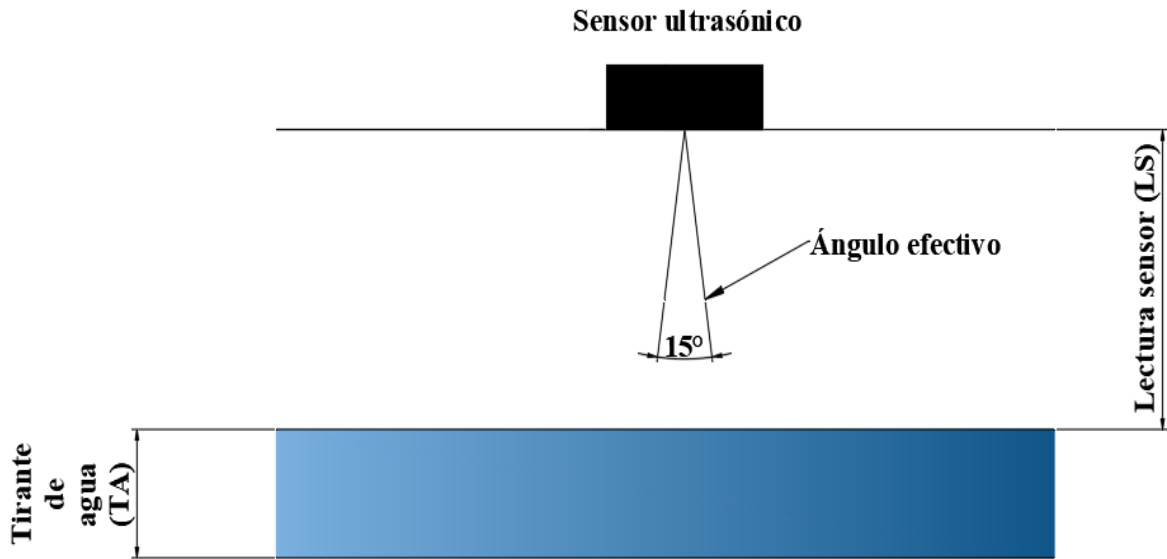
### 3.4.2.3. Sensor ultrasónico

Su principio de funcionamiento se basa en que el sensor emite una onda ultrasónica hacia un objetivo y recibe la onda reflejada del mismo. Los sensores ultrasónicos miden la distancia de un objetivo, calculando el tiempo que se duró entre la emisión y la recepción (Keyence, 2022). Algunos de estos sensores tienen dos transductores, el emisor denominado *trigger* y el receptor denominado *echo*. El emisor emite una onda de sonido ultrasónica a gran frecuencia que se refleja en una superficie como el agua, y luego esta onda se recibe parcialmente a través del receptor (Rodrigues et al., 2022).

Un factor importante es que la velocidad del sonido depende de la temperatura del aire y del tipo de superficie que se propague. Por ejemplo, la velocidad del sensor ultrasónico en el aire es de 345 m/s, en el agua 1500 m/s y en una barra de acero de 5000 m/s (Fathur Rahman et al., 2017).

#### 3.4.2.3.1. Ángulo efectivo o haz efectivo

Se refiere al ángulo de apertura de cono máximo (figura 7) desde el centro del sensor que puede estar un objeto, para ser reconocido y realizar una lectura razonable. En el caso de sensores ultrasónicos usados en la plataforma Arduino como el HC-SR04, el US-025 y el US-100 es de 15°. Esto quiere decir que el sensor es capaz de detectar un objeto dentro de un cono de 15° de ancho en frente del mismo (Gobatti et al., 2022).



**Figura 7.** Ángulo efectivo de un sensor ultrasónico.

#### 3.4.2.3.2. Sensor ultrasónico US-100

Es un sensor ultrasónico de rango de medición entre 0,020 m a 4,50 m, se alimenta tanto a 5,00 V como 3,30 V (figura 8). Cuando se trabaja con el ESP32 en “Sleep Mode” consume menos de 2 mW. Además, posee un sensor de temperatura que corrige la medición de la distancia. El mismo puede trabajar bajo el modo de control analógico GPIO (como el HC-SR04) y bajo el modo de puerto de transmisión serial (Mellinger & Joysey, 2019).

El US-100, puede funcionar bajo el modo de *trigger/echo*, donde el emisor envía una señal de 10  $\mu$ s que emite un tren de pulsos ultrasónicos. Luego el sensor genera un pulso de 5 V hacia el receptor y calcula el tiempo que dura en transmitirse la señal, para obtener la distancia. Por otro lado, este puede funcionar bajo un protocolo de “comunicación serial” a 9600 baudios, 8 bits y no paridad, en donde la distancia es medida enviando el carácter 0x55 para accionar el emisor. Seguidamente, la distancia entre el sensor y el objeto es retornada en mm bajo un dato tipo *integer* de 2 bytes hacia el receptor (Mellinger & Joysey, 2019).



**Figura 8.** Sensor ultrasónico US-100.

#### 3.4.2.4. Pantalla LCD

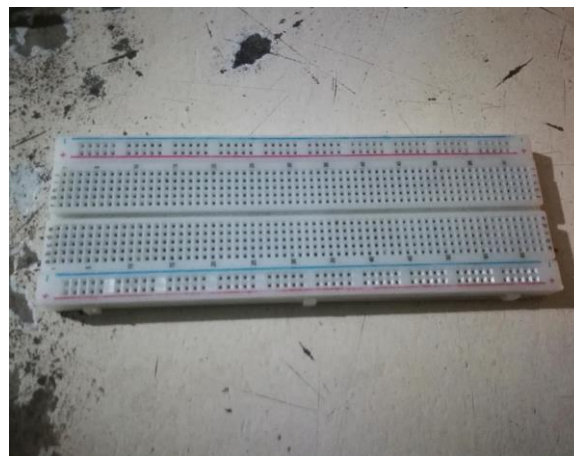
Una pantalla LCD (figura 9) (pantalla de cristal líquido [Liquid Crystal Display, por sus siglas en inglés]), muestran mensajes configurados por el usuario, estas muestran textos en formato ASCII y se comercializan en tamaños como 16x2 y 20x4. Por ejemplo, una pantalla de 16x2 indica que una fila se tiene 16 caracteres y el 2 significa el número de filas en la pantalla (Torrente, 2013).



**Figura 9.** Pantalla LCD 16X2.

#### 3.4.2.5. Protoboard

Las placas de prototipado (figura 10), también se les conoce como “breadboards”, “protoboards”, entre otros nombres, son placas a las cuales se les perforan conexiones internas en las que el usuario puede insertar las patas de los componentes electrónicos, sin la necesidad de soldarlas (Torrente, 2013).



**Figura 10.** Protoboard.

#### 3.4.2.9. Arduino IDE

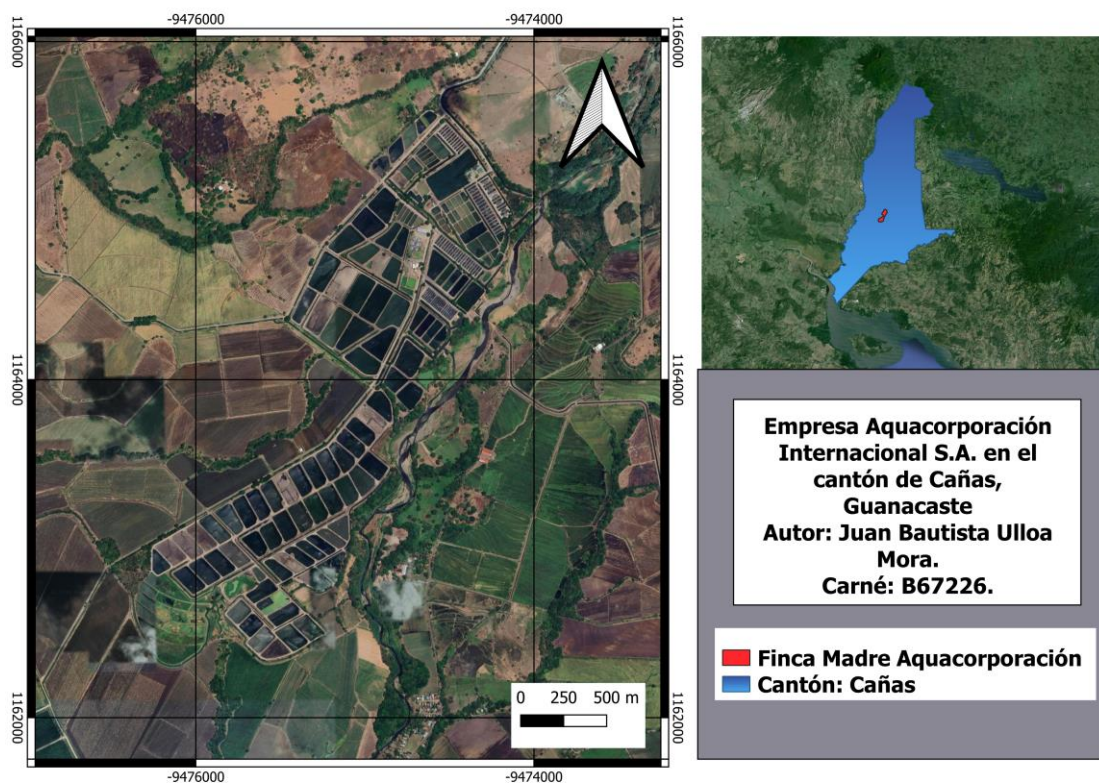
El entorno de desarrollo integrado (IDE) de Arduino, está escrito bajo el lenguaje de programación Java, se utiliza para poder cargar y escribir programas a placas de Arduino o placas de desarrollo de terceros compatibles como el ESP32 (Peña, 2020).



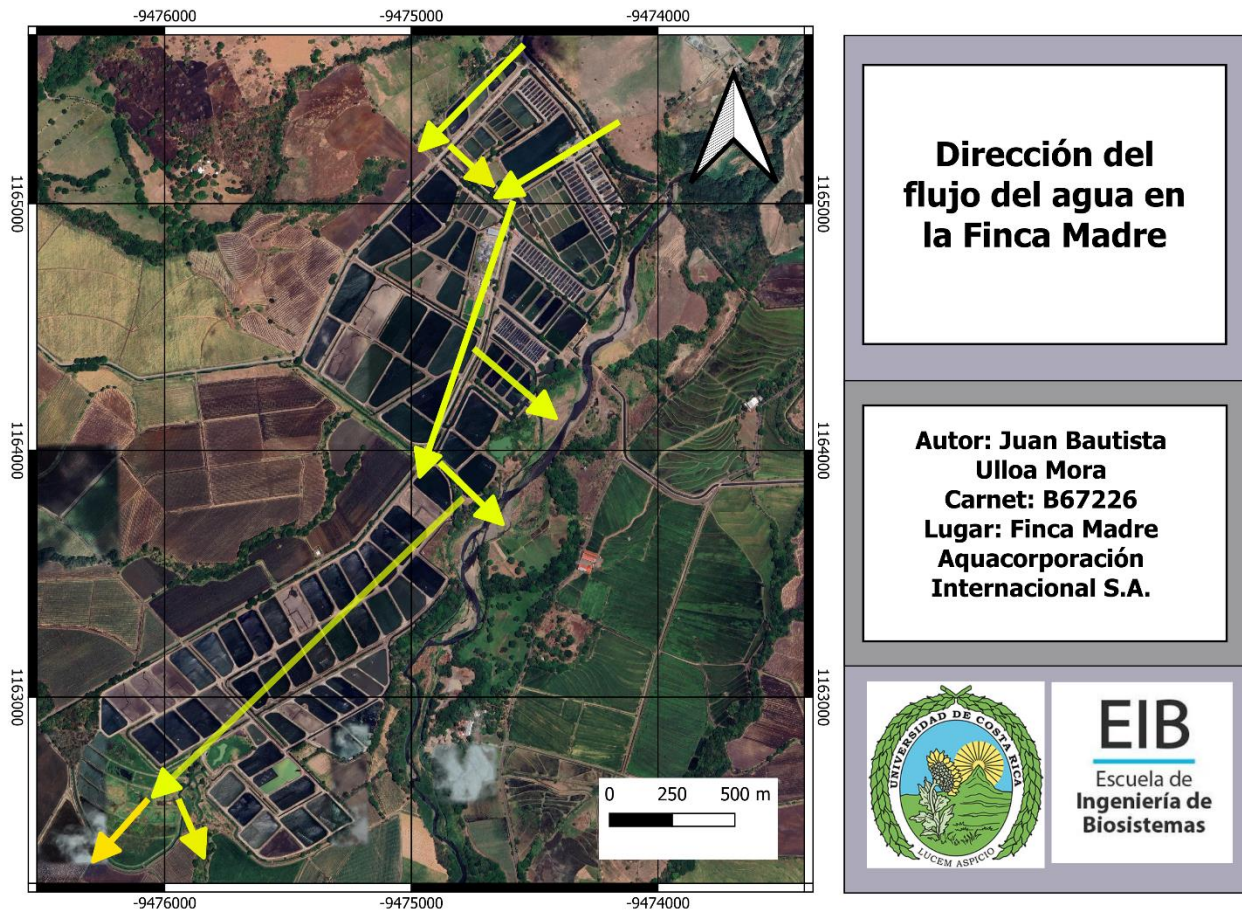
## 4. METODOLOGÍA

### 4.1 Caracterización de la zona de estudio

Parte del objetivo 1 (pruebas en campo) y la totalidad del objetivo 2, se realizó en la “Finca Madre” de la empresa Aquacorporación Internacional S.A, con un área aproximada de 200 Ha. Ubicada en el cantón de Cañas (figura 11), Guanacaste, el cual posee una temperatura promedio de 27,5 °C, una precipitación de 1.520 mm y una humedad relativa del 75%. Los suelos predominantes son los inceptisoles/molisoles y se tiene un periodo seco de diciembre a abril y un periodo lluvioso de mayo a noviembre (MAG, 2024). La zona de estudio recibe aguas del DRAT, a través del canal del Sur. El agua entra hacia la finca dos compuertas en la “Compuerta Principal” y la “Compuerta La Tercera”. Por otro lado, las salidas principales del agua son hacia los humedales artificiales y hacia el río Cañas (figura 12).



**Figura 11.** “Finca Madre” en Cañas, Guanacaste.



**Figura 12.** Circulación del agua dentro de la “Finca Madre”. Las líneas amarillas indican la dirección del flujo de agua.

#### 4.2 Diagrama de la metodología

Con respecto al objetivo 1, en la figura 13 se observa el diagrama de flujo para alcanzar este objetivo. Consiste en la realización de dos actividades: pruebas en el laboratorio y campo para verificar si es preciso el sensor ultrasónico para medir el tirante de agua en la entrada principal de la “Finca Madre”, si se encuentra viable tanto a nivel de laboratorio y campo el sensor se procede al montaje del sensor. Por otra parte, en la figura 14 se encuentra el diagrama de flujo del objetivo 2, el cual consiste en la realización de cuatro actividades: mapeo de la zona (entradas y salidas de agua), mapeo de la zona mediante imágenes satelitales, mapeo de la zona mediante tomas de campo y adquisición de datos por parte de Aquacorporación, cuando se realizan estas se obtiene toda la información necesaria para realizar el balance hídrico dentro de la “Finca Madre”.

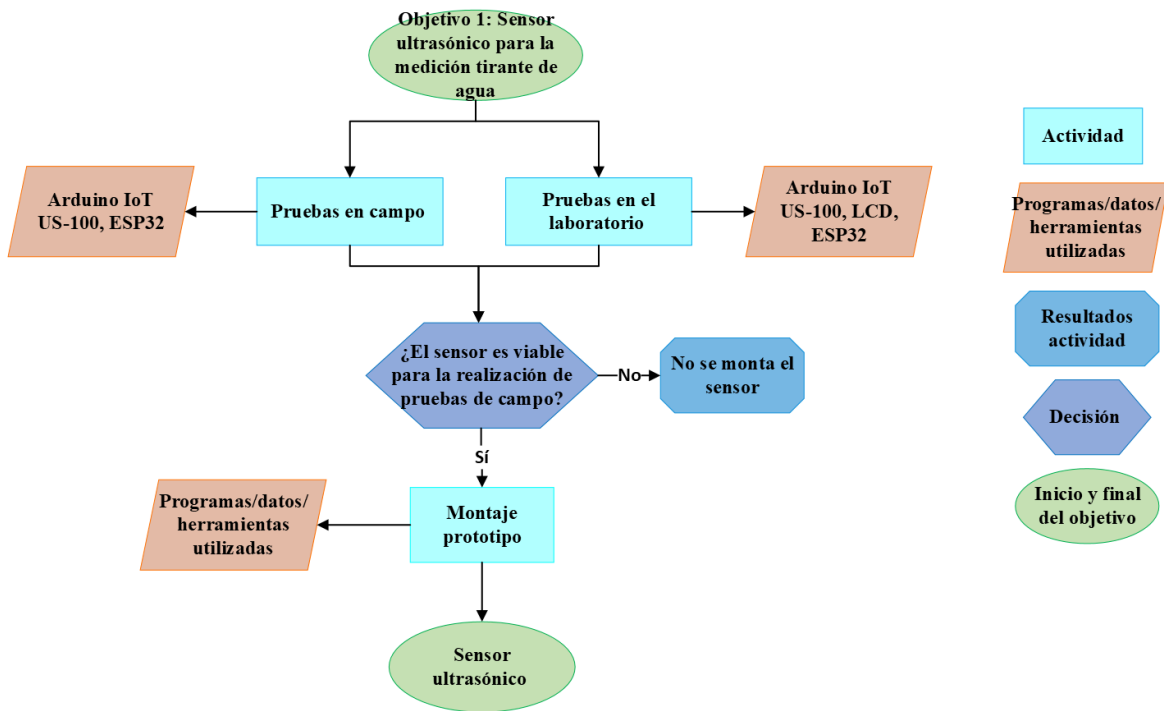


Figura 13. Diagrama de flujo del objetivo 1 del presente estudio.

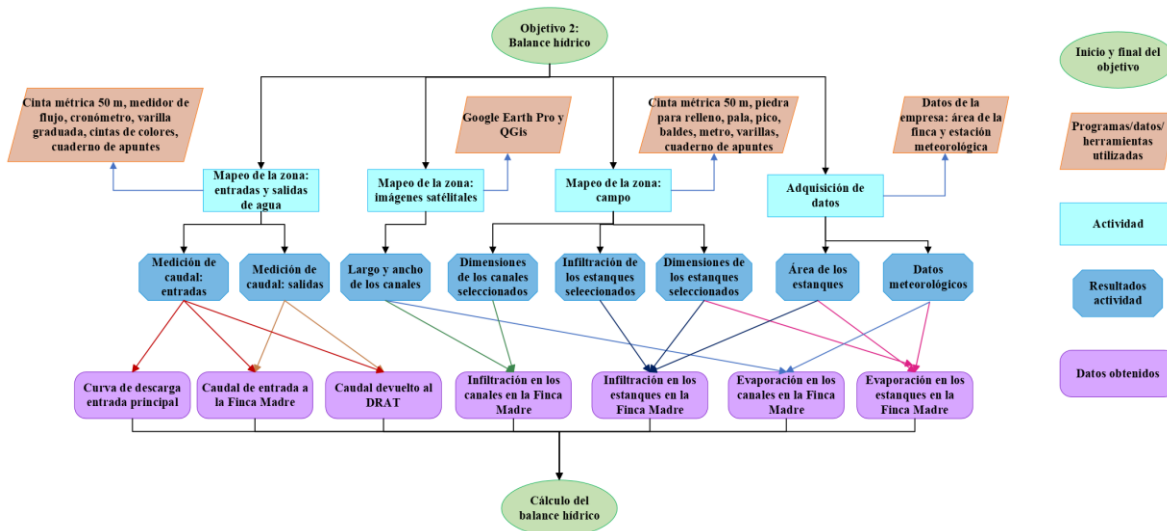
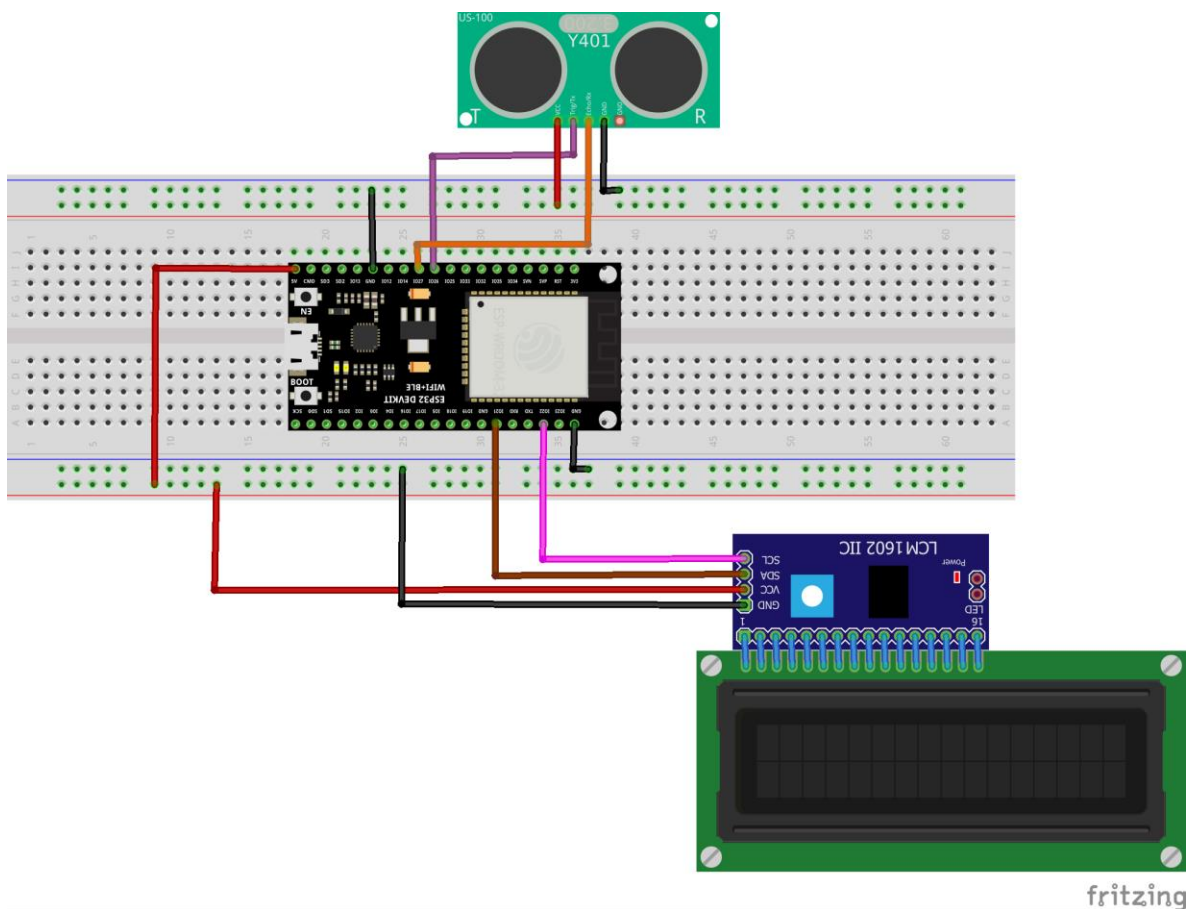


Figura 14. Diagrama de flujo del objetivo 2 del presente estudio.

### 4.3. Ensamblaje y calibración del sensor ultrasónico para medir el tirante de agua “SUTA”

#### 4.3.1. Montaje del sensor “SUTA” para las pruebas realizadas en el laboratorio y pruebas preliminares en campo

El prototipo utilizado en las pruebas de laboratorio para ver el comportamiento del sensor ultrasónico en la medición del tirante de agua bajo diferentes condiciones de flujo estuvo compuesto del sensor ultrasónico US-100, una pantalla LCD 16x2 y un chip ESP32-WROOM-32U (figura 15). Se alimentó el prototipo con una batería recargable de celular de 3,7 V. En el anexo 1, se presenta el código que se cargó en Arduino IDE para el funcionamiento del sensor ultrasónico, con el fin de reducir el error de las lecturas que dio el sensor, se programó de tal manera que suministre el valor promedio de las últimas 10 lecturas y entre ellas se dejó una demora de 500 ms. Esto fue propuesto por Buhion et al. (2022), Gobatti et al. (2022) y Galli et al. (2022), ya que, se reducen los errores en las lecturas al iterar varias veces y sacar luego el promedio, y con esto incertidumbre de los datos suministrados por el sensor.



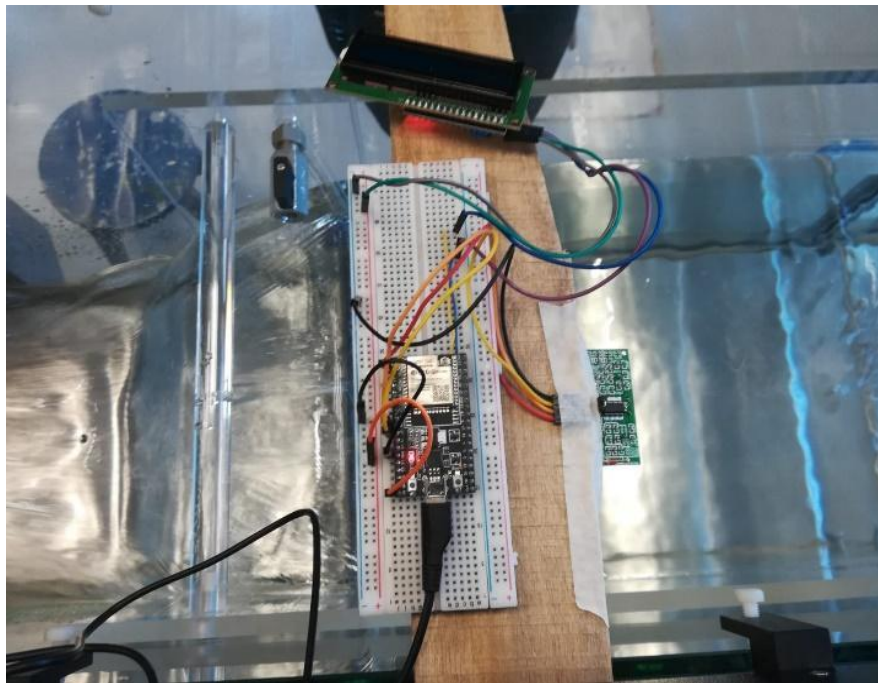
**Figura 15.** Montaje del circuito para realizar las pruebas con el sensor “SUTA”.

#### **4.3.1.1. Pruebas en laboratorio para verificación de precisión del sensor “SUTA”**

Se realizaron pruebas en un canal rectangular de 0,370 a 0,360 m de ancho, 7,450 m de largo y 0,475 m de alto en el Instituto de Investigaciones en Ingeniería de la Universidad de Costa Rica (INII). El flujo que pasa por el canal recircula a través de una bomba y este se mide con un sensor ultrasónico incorporado al equipo del laboratorio. Para verificar las mediciones del sensor “SUTA”, se usó una aguja de precisión de  $\pm 1$  mm acoplada al canal, esto para medir el tirante de agua que estaba pasando para diferentes condiciones de flujo. Esto con el fin de conocer la posible diferencia en las lecturas del sensor “SUTA” con respecto a un canal de pruebas calibrado.

Se trabajó bajo diferentes pendientes (0,10, 0,20 y 1,00%) y diferentes caudales (50,75,100,115 y 125 m<sup>3</sup>/h) y se realizaron 6 combinaciones diferentes de pendiente (%) y caudal (m<sup>3</sup>/h): 0,10% y 75 m<sup>3</sup>/h, 0,20% y 75 m<sup>3</sup>/h, 1,00% y 50 m<sup>3</sup>/h, 1,00% y 100 m<sup>3</sup>/h, 1,00% y 120 m<sup>3</sup>/h, 1,00% y 115 m<sup>3</sup>/h. Se realizaron 8 tomas según puntos de interés, debido a cuestiones de tiempo en el laboratorio, mientras que la lectura con la aguja fue única

Se utilizó un vertedero de pared gruesa, para que funcione de obstáculo y generar un salto hidráulico. Además, se ajustó las condiciones de frontera bajo la abertura y cierre de una compuerta para obtener saltos hidráulicos bajo diferentes longitudes y posiciones. Debido a la disponibilidad de recursos para construir el sensor, este se iba trasladando a las posiciones de interés dentro del canal (salto hidráulico, zonas turbulentas y zonas suaves) (figura 16).



**Figura 16.** Montaje del sensor en una sección del canal

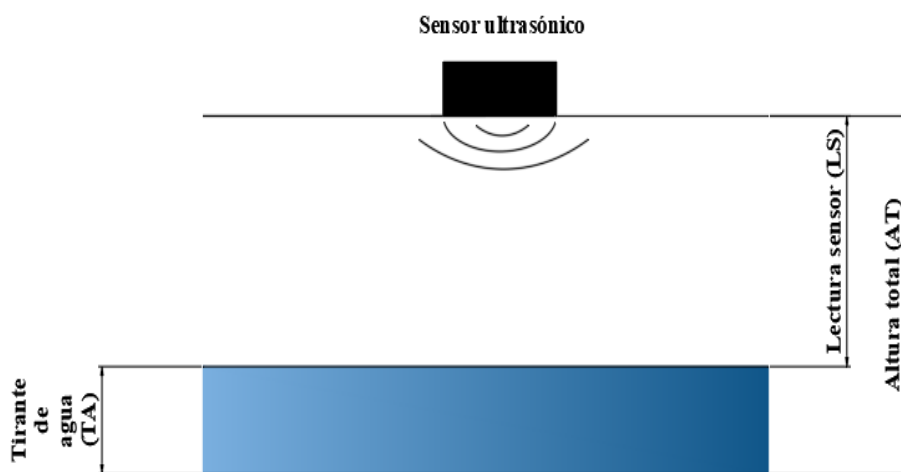
Para conocer la lectura del tirante de agua dado por el sensor “SUTA” (LTS) se utilizó la ecuación 12. La altura total (AT) se obtuvo midiendo esta con una cinta métrica desde la posición del sensor hasta el fondo del canal y la lectura del sensor (LS) es la reportada por el sensor “SUTA”. El tirante

de agua (TA) es el valor reportado mediante la aguja de precisión, seguido se calculó la diferencia entre la lectura del tirante de agua medido por la aguja menos la lectura del tirante de agua medido por el sensor ultrasónico. Con esto se buscaba encontrar si existían diferencias mayores a 2 cm, ya que la exactitud del equipo de medición debe ser menor a 2 cm (Rodrigues et al., 2022), otros autores reportan entre 2 a 5 cm (Boyten, 2003).

$$LTS = AT - LS \quad (12)$$

Donde:

LTS: lectura tirante de agua dada por el sensor en mm, AT: altura total desde el sensor hasta el fondo del canal en mm y LT : lectura del sensor en mm.



**Figura 17.** Diagrama de lectura del tirante de agua bajo el uso del sensor “SUTA”.

#### 4.3.1.2. Pruebas en campo preliminares

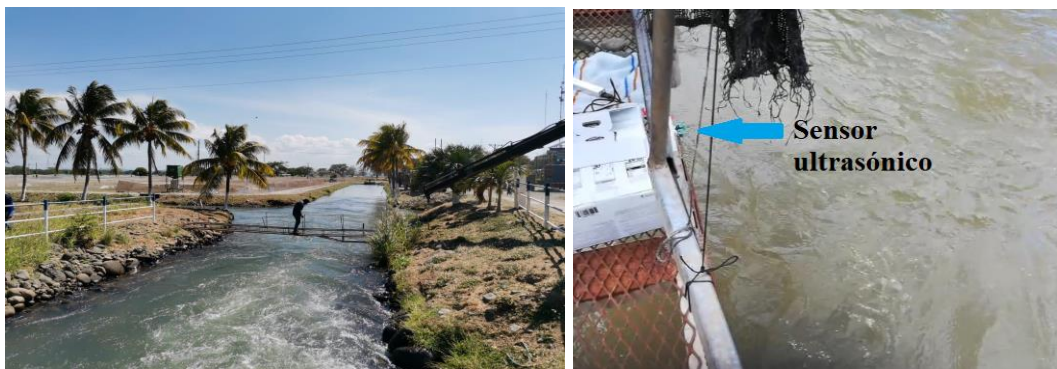
Para las mediciones del tirante de agua en campo, el sensor se colocó sobre un puente provisional (figura 18 a) ubicado en el canal de entrada de agua a la Finca Madre. El sensor ultrasónico realizó mediciones durante una hora en horas de la mañana (figura 18 b). Debido a las altas temperaturas de la mañana se cubrió el sensor con una malla para evitar el sobrecalentamiento (figura 18 c). La única diferencia entre el circuito usado en el laboratorio es que no se utilizó la pantalla LCD (este dispositivo electrónico solo es para ver las lecturas del sensor ultrasónico sin necesidad de un teléfono celular o computadora). No obstante, la programación cambió ya que el sensor se conectó a la red Wi-Fi de un teléfono celular y se usó la plataforma de Arduino IoT (anexo 2).

Cuando se inició la prueba, con una cinta métrica se midió la distancia entre el tirante de agua y el sensor ultrasónico. Se programó el sensor para que tomará los datos cada 1,5 segundos, los datos se guardaron en un archivo con extensión .csv. Con los datos primeramente se construyó un gráfico precontrol para monitorear si las mediciones por el sensor ultrasónico se encuentran bajo control o fuera de control. Como límite central del gráfico precontrol se utilizó la medición realizada por la cinta métrica, los límites inferior y superior se utilizó  $\pm 2$  cm y para el límite inferior mínimo y límite superior máximo se utilizó  $\pm 5$  cm, con respecto al límite central. Se utilizó esto como criterio bajo el supuesto que el sensor ultrasónico para medir el tirante de agua debe tener una exactitud entre 2 a 5 cm (Boyten, 2003). Seguidamente se graficó el error de las mediciones restando a la lectura del límite central cada medición realiza por el sensor (ecuación 13).

$$E_m = L_c - L_s \quad (13)$$

Donde:

$E_m$ : error de la medición del sensor (cm),  $L_c$ : lectura tomado de campo desde el sensor hasta el nivel del agua (cm) y  $L_s$ : lectura tomada por el sensor, desde el mismo hasta el nivel del agua.



18.a

18.b

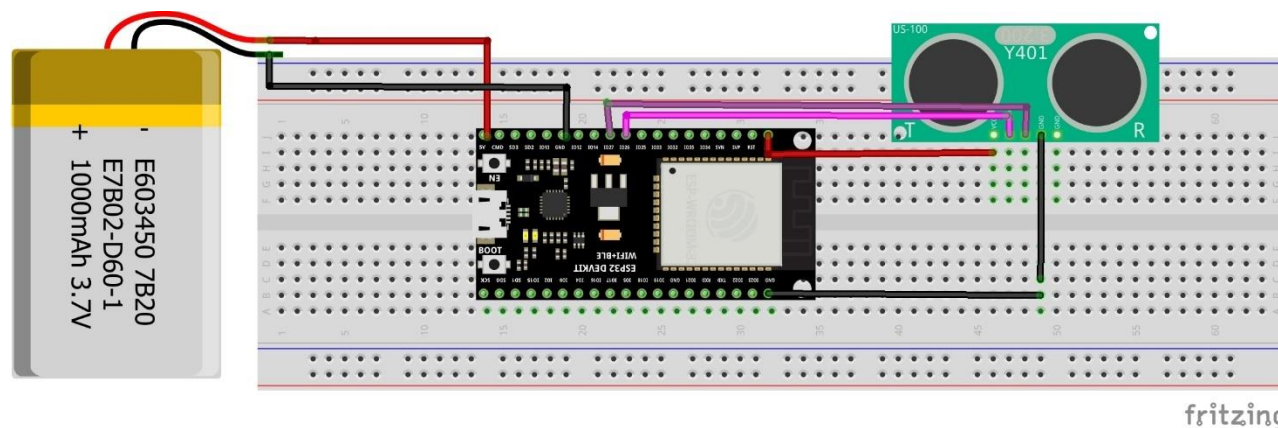


18.c

**Figura 18.** a) Lugar de instalación del sensor en campo, b) posición del sensor con respecto al nivel del agua y c) vista del sensor desde la orilla del canal.

### 4.3.2. Montaje del prototipo del sensor en físico

El prototipo para su montaje en campo, está compuesto de un chip ESP32-WROOM-32U, una batería que puede ser de litio recargable de 8800 mAh o una batería de respaldo “powerbank, en inglés” usadas para cargar celulares, un panel solar de 5 V y 1,25 W, un regulador de voltaje CN3791 y el sensor ultrasónico US-100. En la figura 19, se muestra el montaje del sensor para su posterior armado y en el cuadro 2, se colocan los consumos de energía del ESP32 para saber cuánto durará la batería encendida, hasta que se necesita recargarla de nuevo, este cálculo se realizó en el anexo teórico 4. Por último, en el anexo 3, se muestra el código con el cual se programó el prototipo (figura 19).



**Figura 19.** Montaje del prototipo del sensor en físico para luego su colocación en campo (con fines ilustrativos).

**Cuadro 2.** Consumos de corriente eléctrica de los componentes electrónicos.

	Consumo por hora (mAh)	Consumo por minuto (mAh)
ESP32 modo activo (active mode)	240	4
ESP32 modo sueño profundo (deep sleep mode)	0,15	0,0025
US-100	2	0,033

Fuente: Espressif Systems (2024) & Adafruit (s.f.).

### 4.3.4. Costos

Por último, se realizó un desglose de los costos del sensor en cuanto a costos de dispositivos electrónicos, equipo para soldar y chasis. En los costos no consideraron equipo de protección o accesorios para la colocación del sensor en campo, los costos se basan en las facturas cuando se compraron los componentes en 2023 en tiendas de electrónica.



#### 4.4. Cálculo del balance hídrico

##### 4.4.1. Cálculo del área

Se usó el área de espejo de agua reportada por la empresa Aquacorporación Internacional S.A. Debido a la antigüedad de los datos se procedió a medir estanques dentro de la “finca Madre” para ver si existen diferencias en el tamaño de las áreas. Por último, se calculó el área para el infiltración donde se excluye a los estanques que están hechos de concreto.

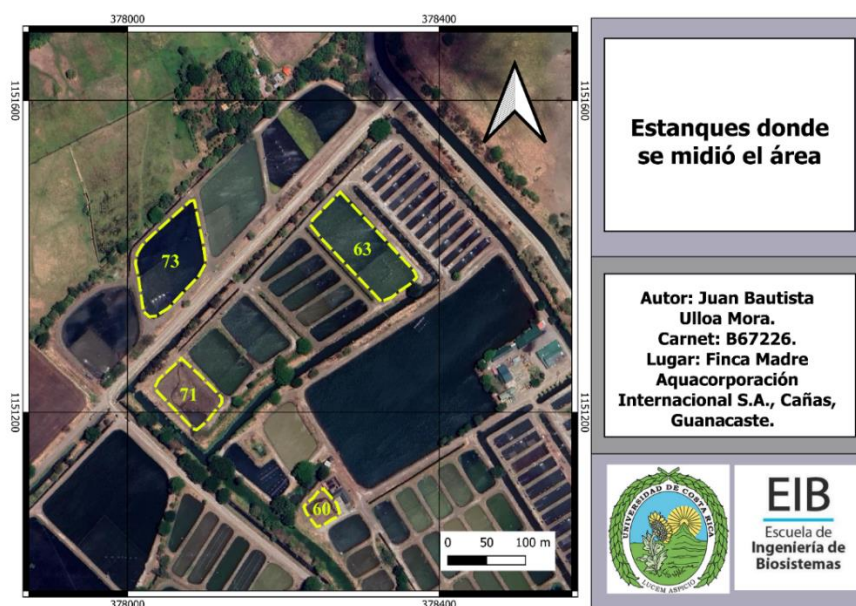
##### 4.4.1.1. Área total del espejo de agua de los estanques

Para obtener el área de influencia se utilizaron los datos del área del espejo de agua suministrados por la empresa, la cual corresponde a 1 444 069 m<sup>2</sup>. Los datos suministrados poseen más de 10 años de antigüedad, por lo que se procedió a medir el área del espejo del agua de 4 estanques aleatorios en la finca, para ver si existen diferencias entre los valores reportados y medidos en campo. Los estanques seleccionados se muestran en la figura 20 (60, 63, 71 y 73) con una cinta métrica de 30 m se procedió a medir los lados de los estanques. Una suposición hecha fue que todos tenían forma rectangular, seguido se procedió a medir el promedio de los lados que corresponden al largo y el ancho, y se calculó las áreas respectivas. Se midieron estanques tanto secos como llenos de agua. No se midió la profundidad del agua, ya que no es de interés para este estudio. Sin embargo, según los datos reportados por la empresa los estanques se llenan a una profundidad de 1 m. Para calcular la diferencia entre los datos reportados de área y los datos de campo medidos, se realizó mediante la ecuación 14.

$$\text{Diferencia (\%)} = \left( \frac{(V_r - V_m)}{V_m} \right) * 100 \quad (14)$$

Donde:

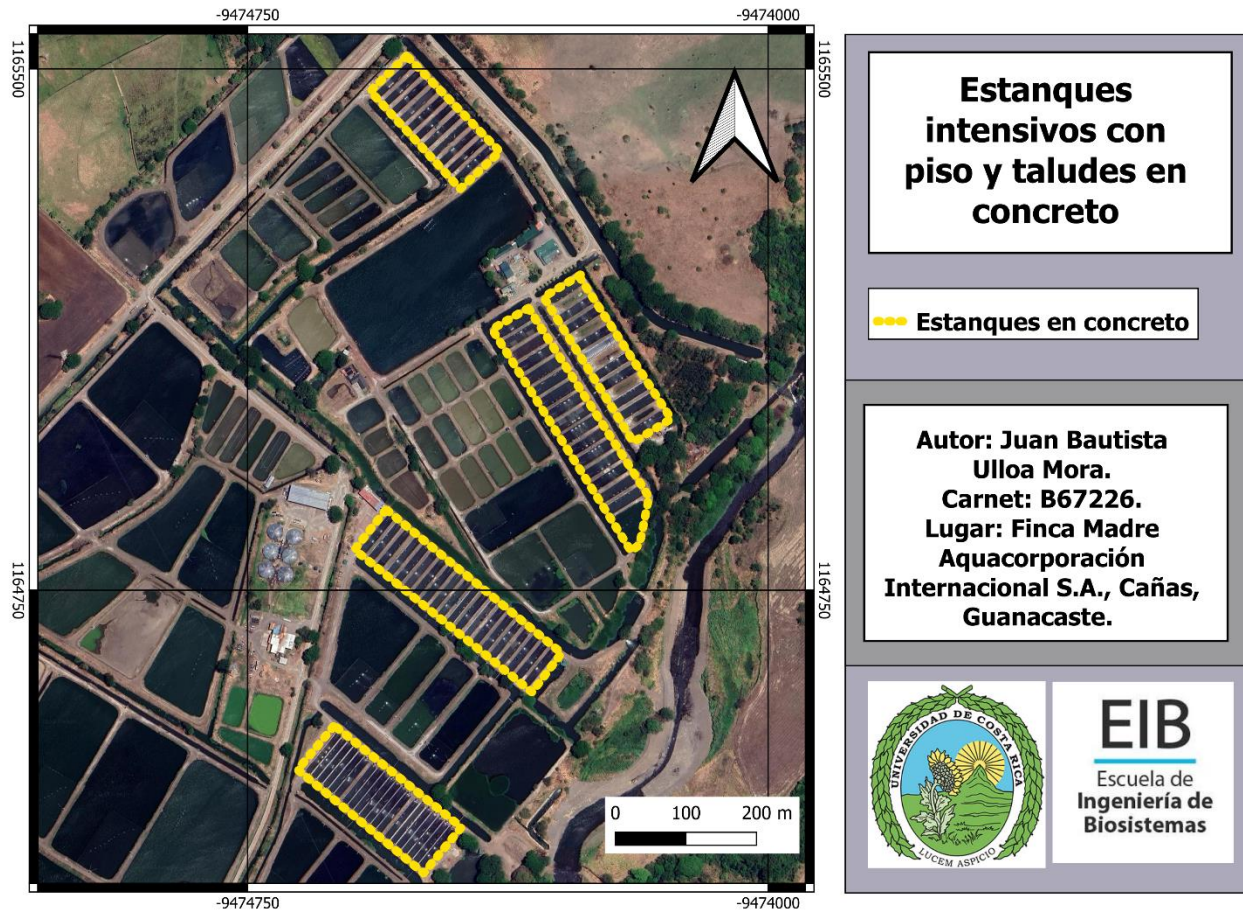
V<sub>am</sub>: valor de área medido en campo (m<sup>2</sup>) y V<sub>ar</sub>: valor de área reportado por la empresa (m<sup>2</sup>).



**Figura 20.** Vista aérea de la Finca Madre. Estanques usados para medir área en campo. Los recuadros en amarillo y enumerados son los tanques que se les midió el área.

#### 4.4.1.2. Área utilizada de espejo de agua para el cálculo de la infiltración

En la “Finca Madre”, se tienen estanques de concreto para uso intensivo acuícola que no se utilizaron para el cálculo de la infiltración de los estanques, ya que se consideraron que poseen una infiltración igual 0. En la figura 21 se señalan en amarillo estos estanques los cuales tienen un área de 53 350 m<sup>2</sup>, por lo que para los cálculos de infiltración se consideró un área de 1 390 710 m<sup>2</sup>.



**Figura 21.** Estanques de concreto dentro de la “Finca Madre”. Los recuadros en amarillos muestran los tanques en concreto.

#### 4.4.2. Pérdidas de agua en los estanques acuícolas

En los estanques acuícolas se consideraron las pérdidas por evaporación e infiltración y los efluentes de salida al Canal del Sur. Por otro lado, los afluentes de agua de los estanques salen por los canales de drenaje dentro de la “Finca Madre”, las salidas de agua se explicarán en apartados siguientes de este estudio (sección 4.5.2.).

##### 4.4.2.1. Evaporación en los estanques

Debido a que no se cuenta con un evaporímetro clase A, se procedió a calcular la evaporación mediante la fórmula de evapotranspiración de Penman-Monteith (Allen et al., 2006). La evapotranspiración fue calculada para los meses de mayor demanda de evapotranspiración (entre marzo y mayo), con los datos de la estación meteorológica que posee la empresa, para los años 2021,

2022 y 2023. Los datos se pasaron en un archivo con extensión .csv, donde mediante el programa Excel, se filtraron los datos, para obtener los valores meteorológicos de interés máximos, mínimos y promedios solicitados por el programa (anexos 4,5, y 6).

Se procedió a introducir los valores de temperatura mínima y máxima (°C), humedad relativa promedio (%) y velocidad del viento (promedio) y horas sol al día (h) en el programa informático CROPWAT 8.0. de la FAO, empleado para balances de agua y cálculo de la  $ET_0$ . Sin embargo, el programa permite la opción de calcular la  $ET_0$ , al introducir los valores de los datos meteorológicos. Se obtuvo la altitud (55 m.s.n.m.), latitud (10° 24' 33,63'' N) y longitud (85° 06' 34,27'' W) mediante el uso de imágenes de Google Earth (anexo 7). Los datos de las horas de brillo solar al día se obtuvieron del Instituto Meteorológico Nacional [IMN] (2013) (anexo 8).

En el programa CROPWAT 8,0 se obtuvo la  $ET_0$  de los meses de estudio (marzo, abril mayo) para los años 2021, 2022 y 2023. Seguido, se procedió a calcular la evaporación en los estanques acuícolas, mediante la ecuación 15. Por último, se procedió a calcular el promedio y la desviación estándar de la evapotranspiración y la evaporación en los estanques por cada mes analizado.

$$E_e = 0,81 * ET_0 \quad (15)$$

Donde:

$E_E$ : evaporación en los estanques acuícolas (mm/mes) y  $ET_0$ : evapotranspiración promedio al mes (mm/mes) y 0,81 es una constante obtenida por Boyd (1985) para uso de estanques acuícolas.

#### **4.4.2.1.1. Volumen de agua perdido en los estanques por evaporación**

Para obtener el volumen total perdido por evaporación en los estanques se utiliza la ecuación 16, seguido se pasa el valor de  $m^3$  a  $Hm^3$  mediante la ecuación 17. Los valores de evaporación promedio de los estanques para los meses de marzo, abril y mayo, se obtienen de la sección 4.4.2.1. y el área del espejo del agua de la sección 4.4.1.1. de la metodología.

$$V_{ee} (m^3) = \left(\frac{1}{1000}\right) * E_e * A_t \quad (16)$$

$$V_{ee}(m^3) * \left(\frac{1}{100}\right)^3 = V_{ee \text{ marzo}} (Hm^3) \quad (17)$$

Donde:

$V_{ee}$ : volumen perdido por evaporación en los estanques al mes ( $m^3$ ) y  $E_e$ : evaporación promedio en los estanques (mm/mes),  $A_t$ : área total del espejo de agua ( $m^2$ ),  $1/1000$  es un factor de conversión para pasar de mm a m y  $(1/1000)^3$  es un factor de conversión para pasar de  $m^3$  a  $Hm^3$ .

#### **4.4.3. Infiltración de agua en los estanques**

Se realizó un análisis que contempló el mapeo de la zona y la toma de datos de infiltración mediante el uso del método de Porchet. Seguido se realizó un análisis estadístico para verificar si existen diferencias significativas entre los estanques acuícolas en cuanto a infiltración y con esta información dividir la finca de una manera adecuada para seguido calcular el volumen de agua perdido por infiltración en los estanques acuícolas.

#### 4.4.3.1. Infiltración de agua en los estanques

El coeficiente de permeabilidad ( $k$ ) (ecuación 18) fue calculado mediante el uso de la prueba de infiltración de Porchet. Para dicha prueba se realizaron agujeros de 40 a 30 cm de profundidad y con diámetros entre 20 y 30 cm (figura 22 a y b). Cada prueba duró 60 minutos y se realizaron en estanques con menos de 7 días sin agua luego de la cosecha de tilapia, esto para encontrar suelos saturados (figura 22 c). Se colocaron en los agujeros varillas de metal que se les anexó una cinta métrica para medir el nivel del agua, seguido se llenó el agujero con piedra (figura 22 d) y se procedió a llenar los agujeros con agua hasta una altura conocida.

Luego, cada 5 minutos, se hacía una nueva lectura de la altura de agua que se registraban hasta que se completaran los 60 minutos. En cada estanque se repitió este proceso en tres agujeros en lugares aleatorios. Los datos, se procesaron en Excel, y se sacó un promedio de los coeficientes de permeabilidad, de las lecturas obtenidas cada 5 minutos, para dar un coeficiente de permeabilidad promedio por cada repetición. Seguido se obtuvieron tres valores de “ $k$ ” por estanque, que se volvió a sacar un promedio para dar un “ $k$ ” para cada estanque. Este es el método recomendado por la FAO (2006) para calcular la infiltración en estanques acuícolas.

$$k = \frac{r}{2(t_2 - t_1)} \ln \left( \frac{r + 2H_1}{r + 2H_2} \right) \quad (18)$$

Donde:

$k$ : coeficiente de permeabilidad (cm/s),  $r$ : radio del agujero hecho en campo (cm),  $H_1$ : nivel del agua (cm) en el tiempo  $t_1$  (s) y  $H_2$ : nivel del agua (cm) en el tiempo  $t_2$  (s).



22.a



22.b



22.c

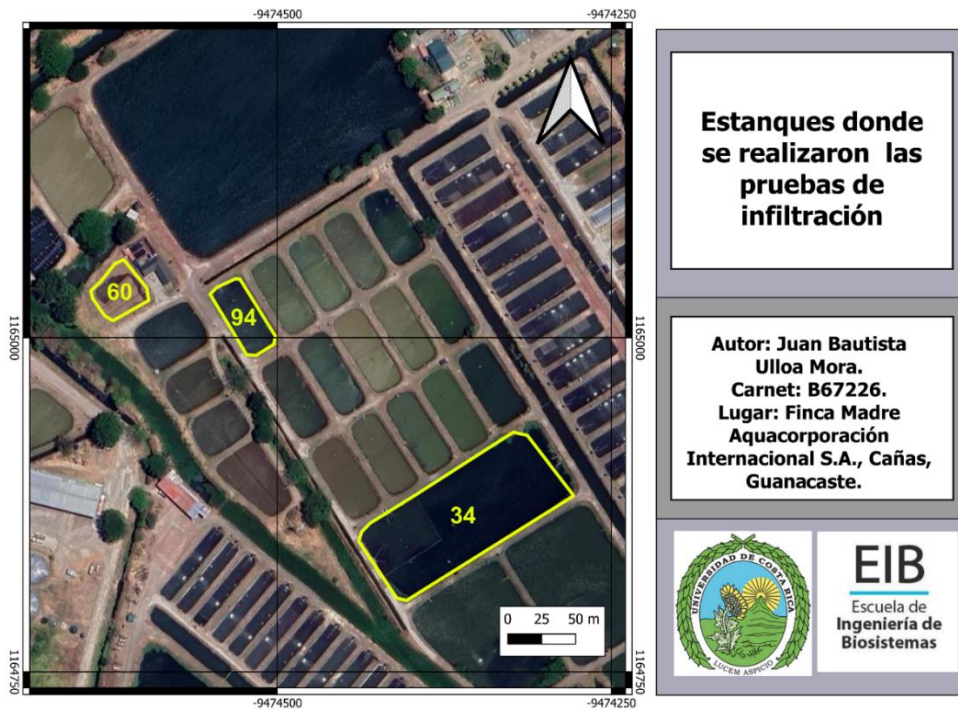


22.d

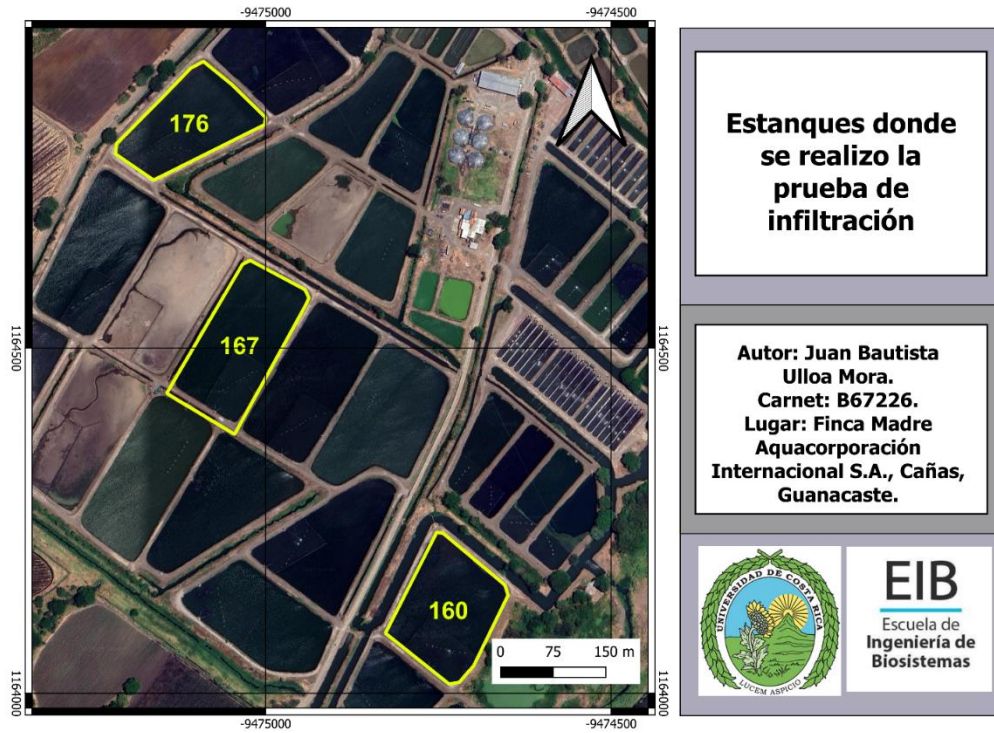
**Figura 22.** Prueba de infiltración en a) estanque 60 y b) estanque 535, c) suelos saturados donde se realizaron las pruebas y d) colocación de piedra en el fondo del agujero.

#### 4.4.3.2. Mapeo de la prueba de infiltración

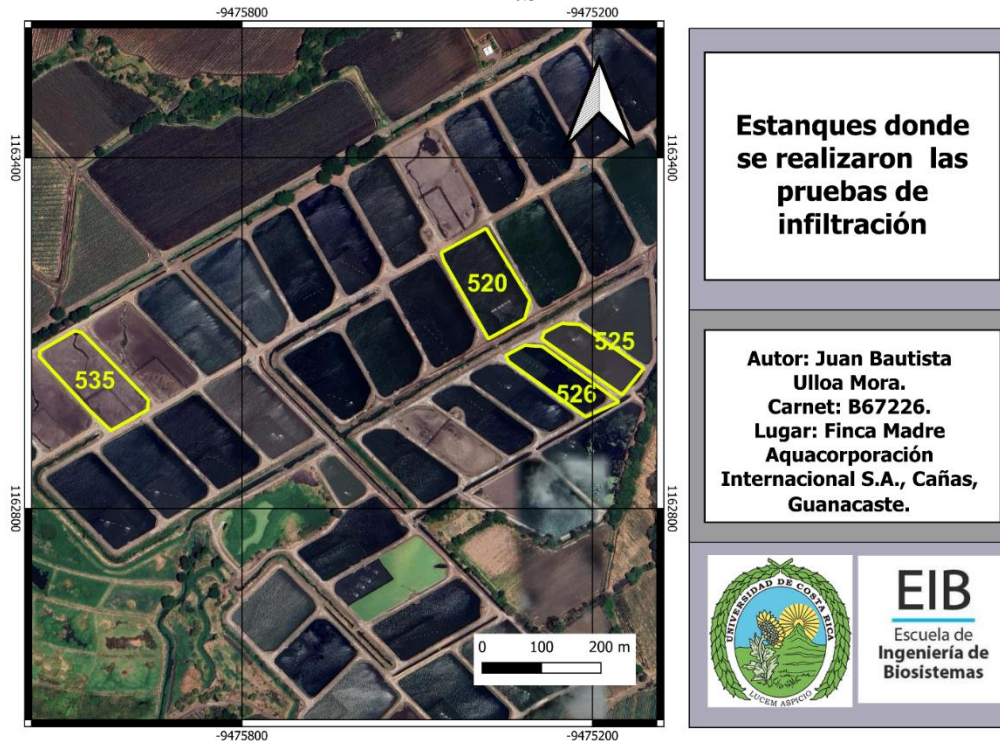
Se realizaron pruebas de infiltración en 10 estanques escogidos aleatoriamente a lo largo de la finca, en cada uno de los estanques se realizaron tres repeticiones en posiciones aleatorias. En la figura 23 a, b y c, se muestran señalados los estanques en los cuales se realizaron las pruebas.



23.a



22.b



22.c

**Figura 23.** Mapeo de los estanques en los cuales se realizaron las pruebas de infiltración. a) “Finca A”, b) “Finca B” y c) “Finca Santa Paula”. Los recuadros en amarillo muestran los estanques donde se realizaron las pruebas mencionadas.

#### **4.4.3.3. Métodos estadísticos considerado para cálculo de infiltración en estanques**

La metodología estadística utilizada en este trabajo busca analizar los datos relacionados con las tasas de infiltración en diferentes estanques bajo distintas condiciones de aforo y repeticiones. Se realizó una prueba de normalidad de Shapiro-Wilks ya que se tenían 30 datos (anexo 10 y anexo 11) en el programa Infostat con una significancia menor a 0,05% y posterior un análisis no paramétrico ( $p < 0,05$ ) por Kruskal-Wallis (anexo 12), para conocer si existen diferencias significativas entre las pruebas de infiltración realizadas a los estanques. La interpretación de estos resultados se utiliza para fundamentar las conclusiones respecto a las variaciones en las tasas de infiltración en función de los diferentes estanques y condiciones de aforo.

#### **4.4.3.4. Volumen de agua perdido en los estanques por infiltración**

Se separó la “Finca Madre” en tres divisiones, por cada división se calculó el coeficiente de permeabilidad promedio mediante el uso de los coeficientes de permeabilidad promedio por cada repetición de los estanques de la sección 4.4.3.1 que correspondían a esta división, este valor se pasó de mm/día a m/mes mediante la ecuación 19 y por último se obtuvo el volumen de agua perdido en la división mediante la ecuación 20. Para obtener el volumen total perdido en los estanques por infiltración se realizó la sumatoria de los valores obtenidos de la ecuación 20. Cuando se utiliza el espejo de agua de los estanques se realiza un supuesto del área de infiltración, con esto se evita estimar el área actual del estanque (fondo del estanque y lados) y se simplifica las labores en campo (Nath & Bolte, 1998).

$$k \text{ promedio } \frac{mm}{día} * \frac{30 \text{ días}}{1 \text{ mes}} * \frac{1 \text{ m}}{(1000 \text{ mm})} = k \text{ promedio } \frac{m}{mes} \quad (19)$$

$$V_{ie} = k \text{ promedio} * A_d \quad (20)$$

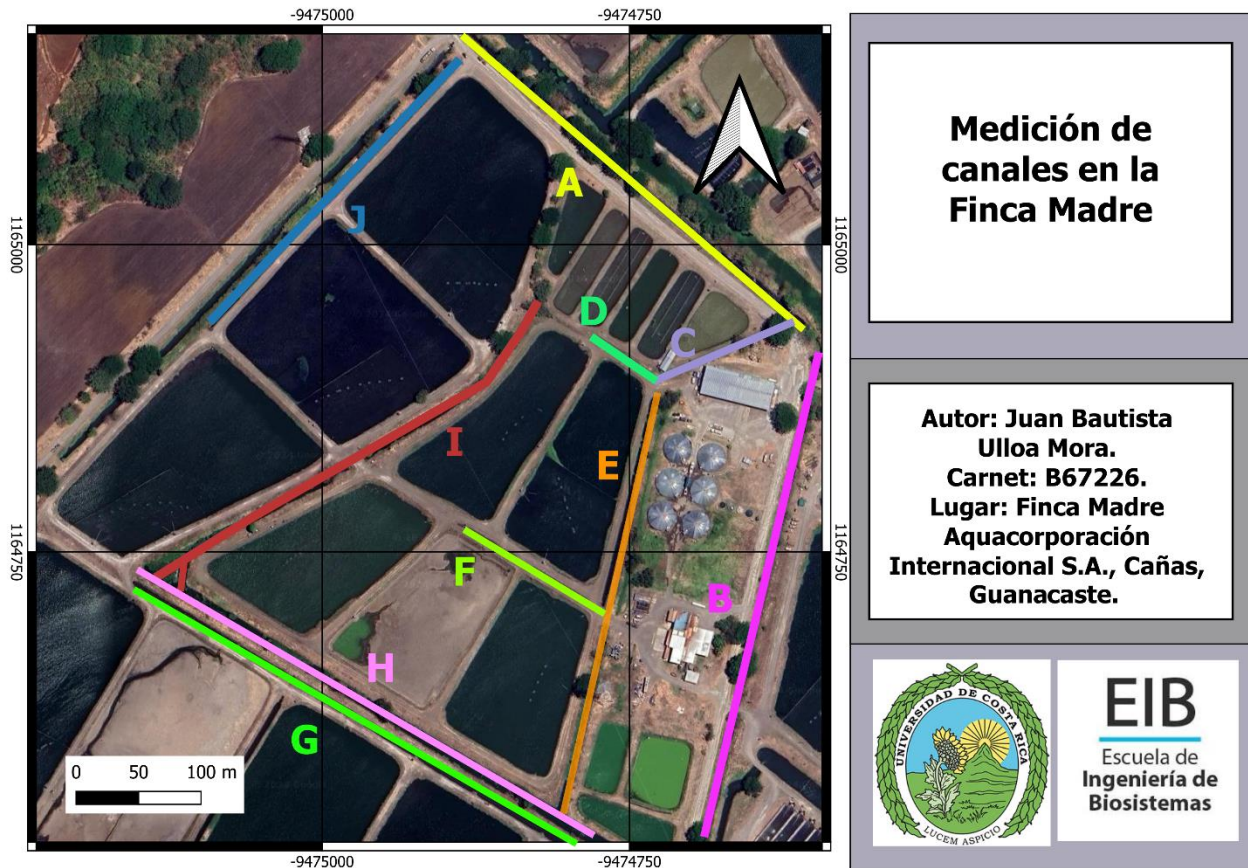
$V_{ie}$ : volumen perdido por infiltración en los estanques al mes en la división ( $m^3$ ),  $k$ : coeficiente de permeabilidad (m/mes),  $A_d$ : área total del espejo de agua de la división ( $m^2$ ).

#### **4.4.4. Pérdidas en los canales**

Primeramente, se calculó el ancho y largo de los canales por Google Earth. Seguido, se realizaron mediciones en campo del tirante de agua, para dividir los canales según su ancho y asignarles un tirante de agua. Con esta información se calculó las pérdidas por evaporación e infiltración en los estanques.

##### **4.4.4.1. Ancho y largo de los canales**

Para obtener el total de canales, su largo y ancho, se utilizó Google EARTH y su herramienta de medición, se dividió los canales por tramo enumerados por letras como en la figura 24, a cada tramo se le realizó como mínimo 5 mediciones de ancho y seguido se calculó el promedio de estas. Para el caso de los largos se realizó dos mediciones (ida y vuelta) y se calculó el promedio.



**Figura 24.** Medición de canales a través de Google Earth. Las líneas de colores representan los canales y como se enumeraron.

#### 4.4.4.2. Pérdidas por evaporación e infiltración en los canales

##### 4.4.4.2.1. Tirante de agua

Con la utilización de una varilla y una cinta métrica, se realizó la medición algunos tirantes de agua en la “Finca Madre”, tanto de drenaje como conducción de agua. Luego, se dividieron los canales en tres categorías menores a 5 m, de 5 a 10 m y mayores a 10 m. Seguido se calculó el promedio de las mediciones de los tirantes de agua medidos en campo y que se incluían en la categoría. Por último,, este valor se redondeó y se obtuvo un tirante promedio de acuerdo al tipo.

##### 4.4.4.2.2. Infiltración

Para el cálculo de las pérdidas por infiltración en los canales primeramente se calcula el perímetro mojado del canal (ecuación 21), seguido su área mojada (ecuación 22), con esta información se calcula las pérdidas por infiltración en el canal por km (ecuación 23). Seguido se calcula el caudal perdido por el canal debido a infiltración primero por segundo mediante la ecuación 24, para pasarlo luego al mes mediante la ecuación 25. Por dificultad de tomar algunas mediciones en muchos de los canales como el ancho solera se consideró que el talud para todos los canales es igual a 1 ( $z = 1$ ).

$$\text{Perímetro mojado } (P_m) = b + 2 * y * \sqrt{1 + z^2} \quad (21)$$

$$\text{Área mojada } (A_m) = (b + zy) * y \quad (22)$$



$$S = C * \sqrt{P} * \sqrt{A} \quad (23)$$

$$\text{Caudal perdido canal } (Q_{pc}) = S * \frac{L}{1000} \quad (24)$$

$$V_{ic} = Q_{pc} * (60 * 60 * 24 * 30) \quad (25)$$

Donde:

b: ancho del canal (m), y: tirante de agua del canal (m), pendiente del canal (m), P<sub>m</sub>: perímetro mojado del canal (m), A<sub>m</sub>: área mojada del canal (m), C: constante que depende del tipo del suelo del canal, S: infiltración en el canal (m<sup>3</sup>/s\*km), L: largo total del canal (m), Q<sub>pc</sub>: caudal perdido en el canal (m<sup>3</sup>/s) y V<sub>ic</sub>: volumen perdido de agua por infiltración en canales al mes (m<sup>3</sup>).

#### 4.4.4.2.3. Evaporación

Con respecto a las pérdidas por evaporación en los canales, se utilizó la ecuación 26. Los valores de evaporación corresponden a los obtenidos en la sección del cálculo de evaporación de los estanques.

$$V_{ec} = b * L_c * (ET_0 * 1000) \quad (26)$$

Donde:

V<sub>ec</sub>: volumen perdido por evaporación en canales al mes (m<sup>3</sup>), b: ancho del canal (m), L<sub>c</sub>: longitud del canal (m), ET<sub>0</sub>: evapotranspiración en el lugar de estudio correspondiente a los meses de marzo, abril y mayo (mm/mes).

#### 4.4. Pérdidas totales de agua dentro de la finca

Para estimar el volumen de agua perdido en la Finca Madre, se utilizó la ecuación 27 y 28, donde se le restó al caudal entrante a la finca las pérdidas debido a los estanques y canales de conducción y drenaje. Para el caudal entrante en la finca se partió del dato teórico de 8 m<sup>3</sup>/s que fue pasado a m<sup>3</sup>/mes, mediante la ecuación 29 y luego se realizó la conversión de m<sup>3</sup> a Hm<sup>3</sup>. Este valor fue el reportado por el SENARA hacia la empresa, que está ingresando en la zona de estudio. Seguido se calculó el porcentaje de agua devuelta y perdida en la Finca Madre, mediante la ecuación 30 y 31. Por último, se calcula el volumen de agua que queda luego de las pérdidas como la resta del volumen de entrada de agua que entra por las compuertas menos la suma total de las pérdidas en la “Finca Madre” por mes.

$$V_{tp} = V_e - V_{pei} \quad (27)$$

$$V_{pei} = \sum(V_{ee} + V_{ie} + V_{ec} + V_{ic}) \quad (28)$$

Donde: V<sub>tp</sub>: volumen total perdido de agua dentro de la finca al mes (Hm<sup>3</sup>), V<sub>e</sub>: volumen entrante en la finca según los datos del SENARA al mes (Hm<sup>3</sup>), V<sub>ee</sub>: volumen perdido por evaporación en los estanques al mes (Hm<sup>3</sup>), V<sub>ie</sub>: volumen perdido por infiltración en los estanques al mes (Hm<sup>3</sup>), V<sub>ec</sub>: volumen perdido por evaporación en los canales al mes (Hm<sup>3</sup>) y V<sub>ic</sub>: volumen perdido por infiltración en los canales al mes (Hm<sup>3</sup>), V<sub>pei</sub>: volumen perdido en infiltración y evaporación.

$$\text{Caudal entrante } \frac{m^3}{s} * \frac{60 s}{1 min} * \frac{60 min}{1 h} * \frac{24 h}{1 día} * \frac{30 días}{1 mes} = \text{Caudal entrante } \frac{m^3}{mes} \quad (29)$$

$$P_{tp} = \frac{(v_{tp})}{v_e} * 100 \quad (30)$$

$$P_d = \frac{(v_e - v_{tp})}{v_e} * 100 \quad (31)$$

Donde:  $P_{tp}$ : porcentaje de agua pérdida total con respecto al volumen entrante de agua (%) y  $P_d$ : porcentaje de agua devuelta con respecto al volumen entrante de agua (%).

#### **4.5. Caudal**

Los caudales en los canales para la entradas y salidas de agua se calcularon mediante aforos realizados empleando el método de la sección intermedia y el método de la sección media. Con las aforos realizados en la entrada principal se realizó una curva de descarga, seguido se realizó un balance hídrico entre las entradas y salidas de agua dentro de la finca.

##### **4.5.1. Medición de caudal en la entrada principal**

Se realizaron 8 aforos en la entrada principal, entre el periodo de mayo y junio del 2023. En estos aforos se midió el ancho superior del canal con una cinta métrica, cuando se obtuvo este dato se dividió en secciones de 0,4 m. Con la misma cinta métrica, se procedió a establecer sobre una cuerda colocada a lo ancho del canal las secciones de 0,4 m y se marcaron con cinta adhesiva de color rojo (cada 0,4 m se colocó una cinta), para un total de 16 a 17 secciones. El criterio para dividir el canal en secciones de 0,4 m se basó en lo expuesto en el anexo teórico 1.

En las zonas donde se colocó la cinta, se midió la profundidad de esa sección del canal con una varilla a la que se le anexó una cinta métrica y con esto obtener el perfil longitudinal del canal. Obtenida la profundidad del canal en cada sección, en una hoja de Excel se obtuvo cual es la distancia que corresponde al 20% y 80% de profundidad de esa sección para realizar en estos dos profundidades la velocidad del agua. El medidor de flujo fue marcado para llegar a estas dos profundidades. Se procedió luego a medir en esa sección la velocidad del agua, donde se colocaron las marcas, el medidor de velocidad de flujo por cada marca se dejó aproximadamente 20 s (figura 25), se siguieron las recomendaciones presentadas en el anexo teórico 2. Se realizó el mismo procedimiento para todas las secciones hasta llegar al final del canal. Por último, para calcular el caudal se utilizó el método de la sección media y la sección intermedia, usando las ecuaciones 6,7 y 8.



**Figura 25.** Medición de velocidad en el canal de la entrada principal.

#### **4.5.2. Curva de descarga**

Para el caso de la curva de descarga, se tomará la entrada principal como un canal estable, por lo que no se realizará los ajustes enunciados en el anexo teórico 3. Por otro lado, al ser un canal artificial el tirante de agua a  $Q = 0$ , coincide con el fondo del canal, razón por la cual la curva de descarga del anexo teórico 3, se simplifica a la ecuación 32. Se tomaron para el ajuste de la curva 7 aforos con su respectivo nivel de agua y seguidamente se procedió a graficar en Excel y obtener la ecuación de la recta y su coeficiente de determinación ( $R^2$ ).

$$Q = a(h_w)^b \quad (32)$$

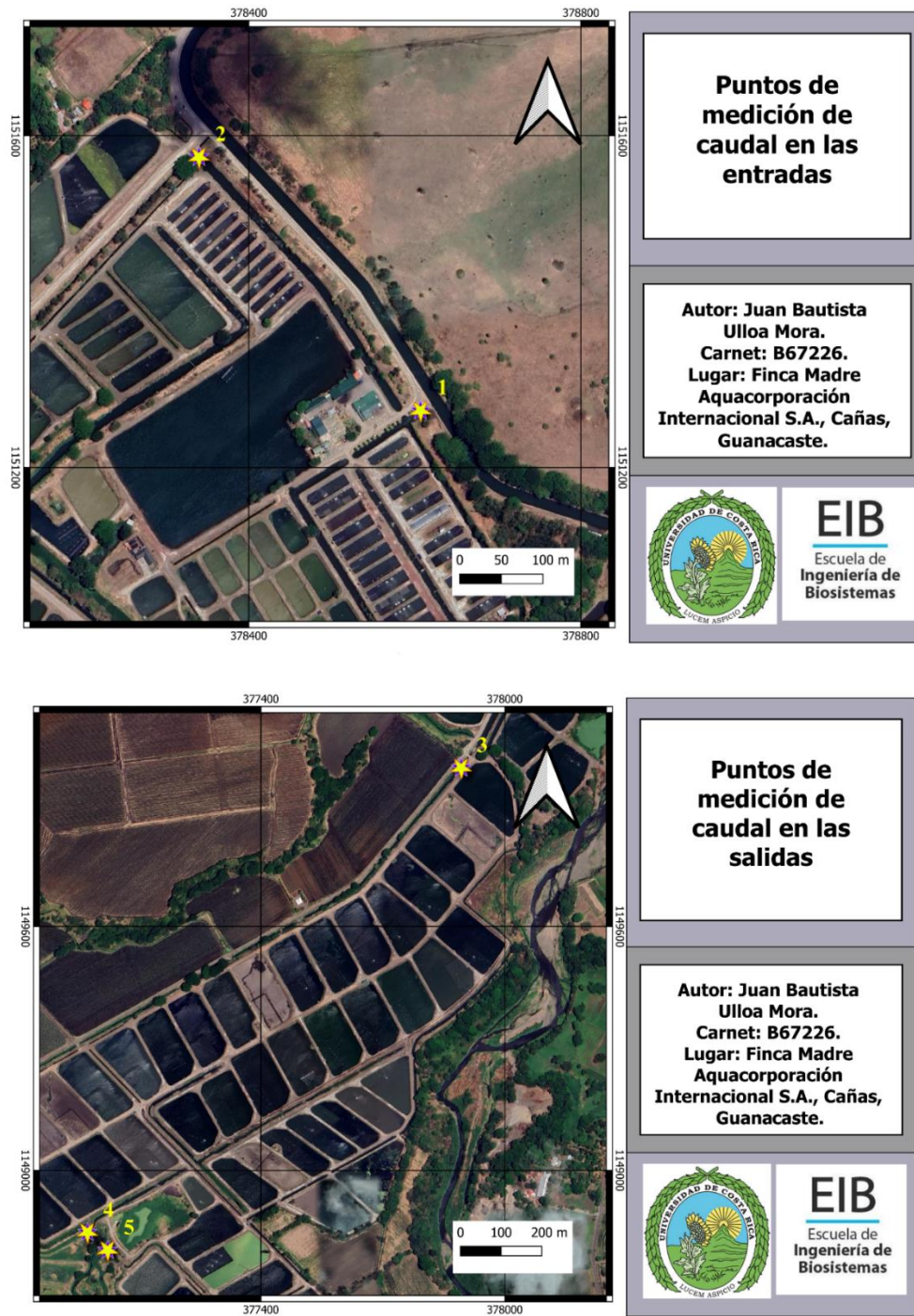
Donde:

Q: caudal para un tirante de agua medido ( $m^3/s$ ),  $h_w$ : tirante de agua medido en campo (m) y a,b: son constantes.

#### **4.5.3. Medición de caudal en entradas y salidas**

El día 8 de junio de 2023, se procedió a realizar los aforos indicados en la figura 29, con la coordinación de mantenimiento se procedió a desviar el agua en las salidas correspondientes al punto 4 y 5 (figura 29 d y e) que se dirigen al río Cañas. El punto 3 de la figura 29 corresponde a una pequeña salida que se dirige también al río Cañas en la entrada de la Finca Santa Paula (figura 30 c). El punto 1 de la figura 29 corresponde a la entrada principal de agua (figura 30 a) y el punto 2 de la figura 29 corresponde a la entrada de agua conocida como "La Tercera" (figura 30 b). En cada punto, se procedió a realizar un aforo siguiendo los mismos criterios de la sección 4.5.1. Se procedió a calcular el balance hídrico mediante la ecuación 33 y seguido se comparó el valor teórico de  $8 m^3/s$  que reporta SENARA con el valor de caudal encontrado en campo. Por otra parte, se realizó una comparación del balance hídrico descrito anteriormente y el encontrado al realizar la resta de las entradas de caudal a la finca menos la pérdidas debido a los estanques y canales, para esto se utilizó

la ecuación 34. Los valores reportados de pérdidas dentro de la “Finca Madre” se reportaron en  $\text{Hm}^3/\text{mes}$  por lo que se pasaron a  $\text{m}^3/\text{s}$ .



**Figura 26.** . Puntos de aforo para realizar el balance hídrico (estrellas amarillas 1 y 2: entradas de agua en la finca y estrellas amarillas 3,4 y 5: salidas de agua de la finca).



27.a



27.b



27.c



27.d



27.e

**Figura 27.** Entradas y salidas dentro de la "Finca Madre" a) entrada principal , b) entrada "La Tercera", c) salida en la entrada Finca Santa Paula, d) salida directa al río Cañas y e) salida compuerta CD9-2.

$$BH_{dc} = \sum Q_{entt} - \sum Q_{salt} \quad (33)$$

Donde:  $BH_{dc}$ : balance hídrico obtenido de los datos de campo ( $m^3/s$ ),  $Q_{entt}$ : caudal de todas las entradas de la “Finca Madre” (punto 1 y 2 de la figura 29) ( $m^3/s$ ) y  $Q_{salt}$ : caudal de todas las salidas de la “Finca Madre” (punto 3,4 y 5 de la figura 29) ( $m^3/s$ ).

$$BH_p = \sum Q_{entt} - \sum P_{tot} \quad (34)$$

Donde:  $BH_p$ : balance hídrico según las pérdidas totales ( $m^3/s$ ),  $Q_{entt}$ : caudal de todas las entradas de la “Finca Madre” ( $m^3/s$ ) y  $P_{tot}$ : pérdidas totales dentro de la finca ( $m^3/s$ ).

## 5. RESULTADOS

### 5.1. Sensor ultrasónico “SUTA”

#### 5.1.1. Pruebas en laboratorio

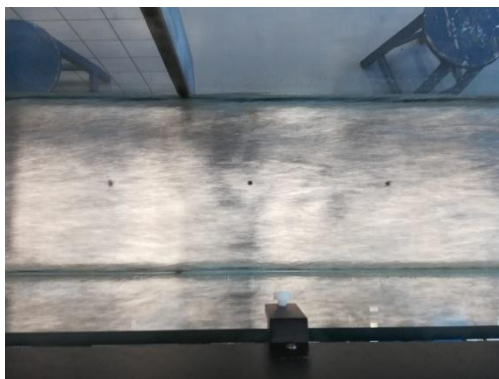
En el cuadro 3, se muestran los resultados obtenidos para las pruebas hechas en el laboratorio. Se observa que se tiene un error en el tirante de agua medido con el sensor entre 0,20 a 0,60 cm. Los errores con mayor magnitud en las lecturas del sensor se deben a condiciones de flujo muy turbulento (figura 28 d,e y g), mientras que los errores más pequeños se encuentran cuando el flujo es suave sin mucha turbulencia (figura 28 a, b y f), por lo que se concluye que entre menos turbulenta sea el agua menor incertidumbre en las mediciones se tendrá. Hubo una excepción con la medida 6, ya que se tuvo un error de 0,20 cm bajo condiciones de flujo turbulento. Esto se puede explicar, a que debido a que solo se tenía un sensor este se iba trasladando de posición. Por lo que, pese a que se tenía flujo turbulento no son las mismas condiciones en el inicio que al final del canal de pruebas, esta medición se realizó casi al final de este dispositivo por lo que el flujo presentaba menos turbulencias

Esto concuerda con lo reportado por Galli et al. (2022), los autores encontraron que el sensor ultrasónico es más exacto cuando las condiciones de flujo en la superficie del agua son más suaves, ya que encontraron en su estudio  $r^2$  cercanos a 0,60 cuando hay fluctuaciones en las condiciones de flujo, mientras que se encontraron  $r^2$  mayores a 0,90 en condiciones de flujo suave. Rodrigues et al. (2022) por su parte, concluyeron que entre el flujo sea más turbulento se tendrá mayor incertidumbre en los datos y que la dispersión en las mediciones está más ligada a las condiciones de flujo que en los métodos de medición. Esto se debe a que los errores fueron menores en condiciones de flujo permanente donde se tenía menos turbulencias, ya que se encontraron desviaciones estándar entre 0,00032 m a 0,00311 m en los sensores utilizados. Mientras que en condiciones de eventos transitorios que se tenía variabilidad de condiciones de flujo, se tuvieron desviaciones estándar entre 0,02055 a 0,0252525 m.

**Cuadro 3.** Lecturas hechas con el sensor y aguja en el laboratorio y diferencia entre ellas.

Toma	Pendiente (%)	Caudal (m <sup>3</sup> /h)	LTS (cm)	TA (cm)	Diferencia entre las lecturas (LTS-TA) (cm)	Distancia entre el sensor y el tirante de agua (cm)	Observaciones
1	0,1	75	4,3	4	0,3	44,5	Flujo suave
2	0,2	75	3,3	3,2	0,1	45,3	Flujo suave
3	0,2	75	8,1	7,7	0,4	20,5	Flujo suave casi plano
4	1	50	10,6	11,2	0,6	47,8	Flujo muy turbulento
5	1	100	14,7	15,3	0,6	43,7	Flujo muy turbulento
6	1	125	20,9	20,7	0,2	37,5	Flujo turbulento
7	1	115	5,7	6,3	0,6	52,7	Flujo suave con oscilaciones
8	1	115	19,4	19,8	0,4	39	Flujo muy turbulento

Nota: LTS es la lectura del tirante de agua por el sensor y TA es la lectura del tirante de agua por la aguja.



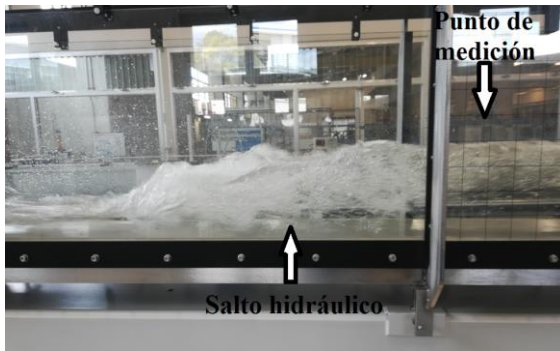
**28.a**



28.b



28. c



28.d



28.e



28.f





28.g

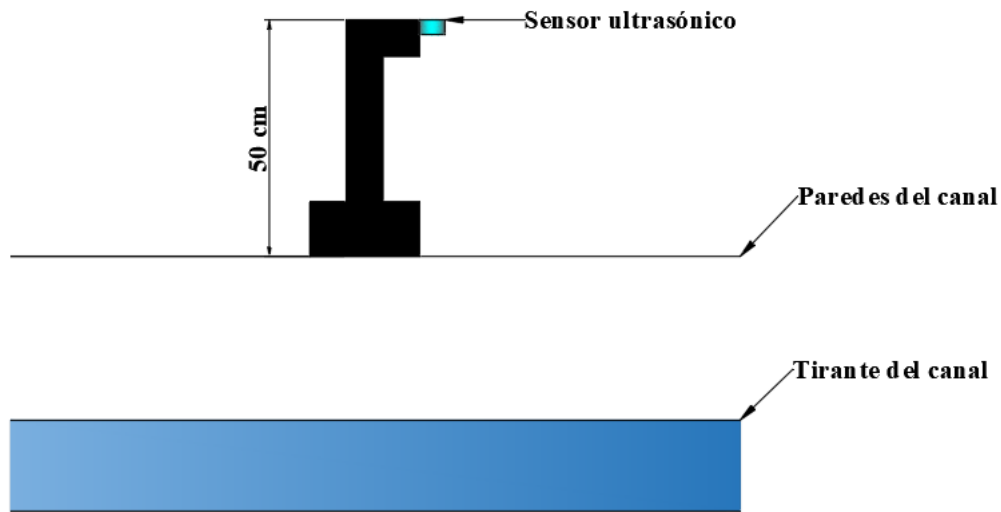
**Figura 28.** Condiciones de flujo en el canal de prueba a) toma 2 medición realizada justo después del vertedero con  $75 \text{ m}^3/\text{h}$  y  $0,2\%$  de pendiente, b) y c) toma 3 medición justo antes del vertedero con  $75 \text{ m}^3/\text{h}$  y  $0,2\%$  de pendiente, d) toma 4 justo después del salto hidráulico, e) toma 5 justo en el salto hidráulico, f) toma 7 medición bajo condiciones de flujo suave al lado más alejado del canal contrario a la posición del vertedero y g) toma 8 igualmente en el salto hidráulico.

Por otro lado, todas las mediciones se realizaron a una distancia menor de  $0,53 \text{ m}$  (cuadro 3) entre el sensor y el tirante de agua, y cuando se colocó el sensor a una distancia mayor a  $0,46 \text{ m}$  se encontraron los mayores errores de medición del tirante de agua. Por otra parte, se encontró que entre menor sea la distancia entre el sensor y el tirante de agua se tendrá un error más pequeño. Esto concuerda con lo reportado por Galli et al. (2022) bajo el uso del sensor HY-SRF05, los autores encontraron que la distancia óptima entre el sensor y la superficie del agua es de alrededor de  $0,50 \text{ m}$  (se encontró un error menor al  $6\%$  en comparación con los sensores ultrasónicos que se tenían en laboratorio) y que entre más pequeña la distancia, se acorta el error. Por su parte Rodrigues et al. (2022) encontraron que a distancias mayores a  $0,40 \text{ m}$  el sensor HC-SR04 empieza a dar más incertidumbre entre las medición reportadas por el sensor. Ya que a una distancia de  $5 \text{ cm}$  se tuvo errores absolutos entre  $-0,002 \text{ m}$  a  $0,001 \text{ m}$ , para una distancia de  $20 \text{ cm}$  entre  $-0,002 \text{ m}$  a  $0,003 \text{ m}$  y una distancia de  $40 \text{ cm}$  entre  $-0,008 \text{ m}$  a  $-0,004 \text{ m}$ , entre el método para calcular el tirante de agua en el laboratorio y la medición del sensor ultrasónico utilizado.

Se trató de usar el sensor US-100 a una distancia mayor, mediante el uso de una “torre” de  $0,50 \text{ m}$  (figura 29). Sin embargo, las lecturas del sensor discrepaban en gran tamaño. Este error se atribuye directamente, a que las paredes del canal ( $30 \text{ cm}$ ) estaban chocando con la señal del sensor, por lo que se debe verificar que entre el sensor y el nivel del agua a medir no haya obstáculos que pueden interferir con la medición en el perfil horizontal. Además, como recalca Rodrigues et al. (2022) este tipo de sensores fueron creados para medir superficies sólidas, los mismos usan la reflectancia de la superficie que en el caso del agua tiene una superficie irregular y variable que puede incrementar el error en las mediciones efectuadas por este dispositivo.

Por último, los resultados muestran que el sensor ultrasónico US-100 se puede usar a escala de laboratorio para medir el tirante de agua, ya que el error hasta para flujo muy turbulento es menor a  $0,6 \text{ cm}$ . En el caso de la exactitud que debe tener un equipo para medir el tirante de agua para estudios hidrológicos y ríos y diseño de proyectos de riego o prevención de inundaciones debe ser menor a

un error entre 2 a 5 cm (Boyten, 2003), otros autores reportan menos de 2 cm (Rodrigues et al., 2022).



**Figura 29.** Torre realizada para medir lecturas con el sensor a distancias mayores a 0,50 m.

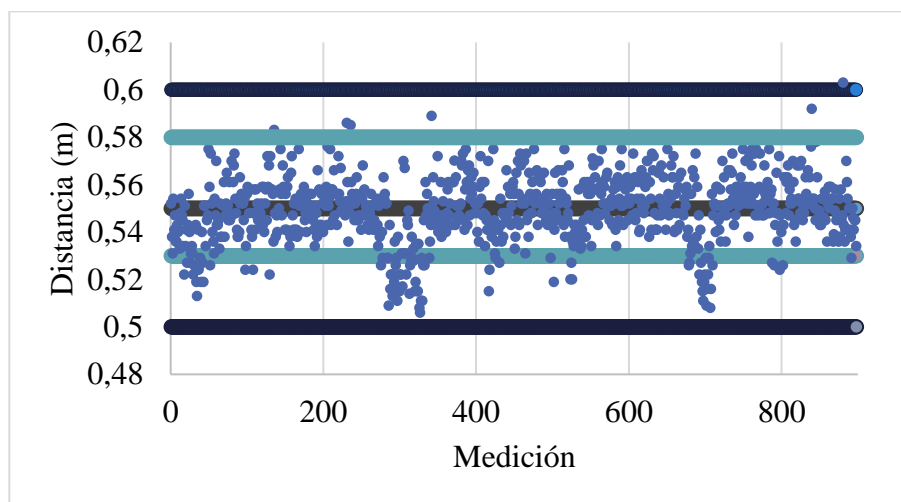
### 5.1.2. Pruebas en campo

El día 23 de junio de 2023, se instaló el sensor en el canal de la entrada principal de la "Finca Madre". Este se instaló a una altura de aproximadamente 0,50 m con respecto al nivel del agua, las mediciones se realizaron de 10:39 a 11:39 a.m. En la figura 30, se muestra el gráfico precontrol de las mediciones de la distancia medidas por el sensor entre el tirante de agua del canal y este. El límite central corresponde a la medición realizada con cinta métrica al inicio de la prueba (0,55 m). El gráfico tiene como límite superior 0,57 m, límite superior máximo 0,60 m, límite inferior 0,53 m y límite inferior mínimo 0,50 m, siguiendo las recomendaciones de que el sensor debe de tener una exactitud de entre 2 a 5 cm para ser usado en aplicaciones hidrológicas (Boyten, 2003).

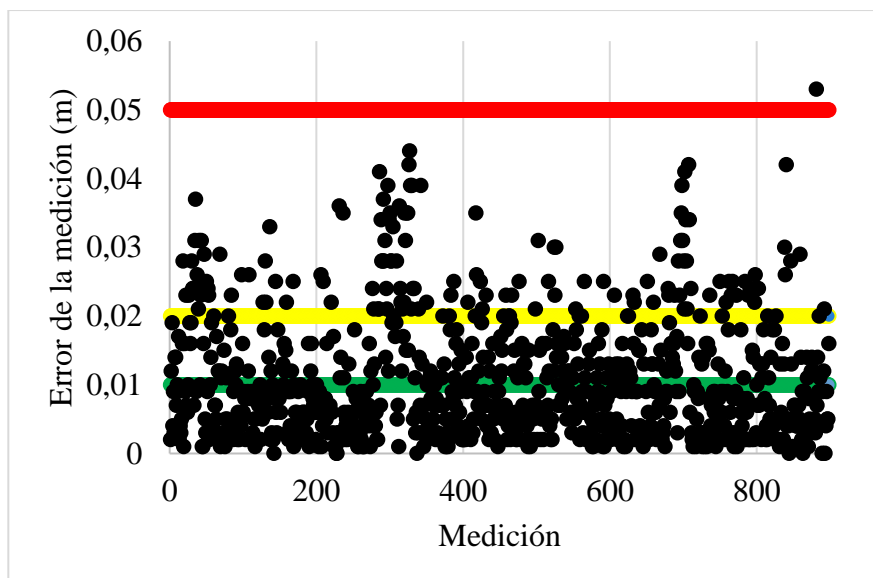
Por otro lado, se observa que solo una medición se encuentra fuera de control, y que la mayoría de mediciones se encontraron por debajo del límite de 2 cm. Cabe resaltar que se observan algunos cambios bruscos ("picos") en la altura. La razón de esto es que el sensor es muy sensible al movimiento y cuando se iba a verificar la lectura y se atravesaba el puente (que era inestable) este tambaleaba por lo que este error puede venir de aquí. Se debe recordar, además, que la medición se hizo al inicio de la prueba y el nivel del agua nunca es constante como se explicará en secciones posteriores, por lo que es de esperarse que el nivel del agua cambió de 0,55 m a lo largo de la prueba.

Las mediciones obtuvieron un promedio  $0,543 \text{ m} \pm 0,0139 \text{ m}$ , con esto se tiene un error del 1,27% si se compara el valor promedio con la medición de 0,55 m realizada en campo. Además, se aprecia en la figura 31, que la mayoría errores de las mediciones son inferiores a 1,00 cm al compararlo con la medición que se midió con la cinta métrica de 55,00 cm. La desviación estándar con respecto al valor promedio de las mediciones es de 1,39 cm, por lo que está entre el rango permisible ( $<5 \text{ cm}$ ), para mediciones en hidrometría.

Otra observación, es que la colocación del sensor fue en un lugar donde se presentaba un flujo de agua poco turbulento (figura 32). Se realizaron pruebas preliminares en una zona más turbulenta (figura 33) y se obtuvieron mediciones más variables por lo que se decidió cambiar de zona donde se colocó el sensor (se tenían errores de hasta 10-15 cm), por lo que a mayor turbulencia en el flujo de agua se tendrá un mayor error. Por último, se intentó realizar pruebas a más de 1 m, con un soporte (figura 34), sin embargo, el error fue mayor a 10 cm. Además, como se aprecia en la figura 41, el soporte tiene un pequeño ángulo que afectaba las mediciones, ya que el sensor es muy sensible a los cambios de inclinación.



**Figura 30.** Lecturas realizadas por el sensor en el lapso de tiempo estudiado. Líneas azul oscuro corresponden a los límites inferior mínimo y límite superior máximo, línea gris corresponde al límite central y las líneas celestes el límite inferior y superior.



**Figura 31.** Error de la medición del sensor con la medición inicial de 0,55 m. Línea verde corresponde a un error de 1 cm, línea amarilla corresponde a un error de 2 cm y línea roja corresponde a un error de 5 cm.



**Figura 32.** Zona donde se colocó el sensor (poco turbulenta).

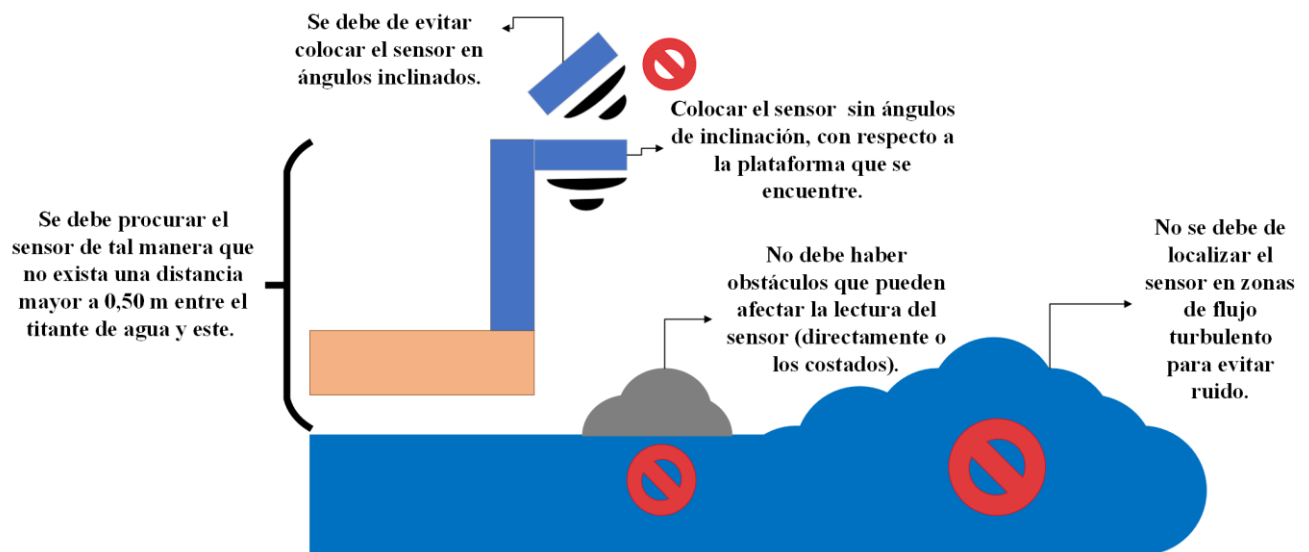


**Figura 33.** Zona preliminar donde se colocó el sensor (muy turbulenta).



**Figura 34.** Soporte colocado para la colocación del sensor.

Culminando este apartado en el cuadro 4, se muestran los principales hallazgos de este estudio y otros estudios en el uso de sensores ultrasónicos de bajo costo para medir tirante de agua en canales y ríos. Con las observaciones realizadas tanto a nivel de laboratorio como campo, el sensor puede ser utilizado para medir el tirante de agua, siempre y cuando se localice en un lugar abierto sin obstáculos y que se encuentre lo más cercano al agua. Se debe colocar en un lugar con pocas vibraciones y con el menor ángulo de inclinación posible cuando ve directo el tirante de agua (figura 35).



**Figura 35.** Recomendaciones para la colocación del sensor.

**Cuadro 4.** Hallazgos en el uso de sensores ultrasónicos de bajo costo en la medición de tirante de agua en canales y ríos.

Estudio	Sensor utilizado	Observaciones
Nasution et al. (2018)	HC-SR04	Estudio realizado en un río en Indonesia. Cuando se trabaja el sensor en una distancia entre 0,8 a 1,3 m con respecto al nivel del agua, se obtiene una precisión del 96,6% en promedio y se obtienen errores entre 3 a 4 cm.
Galli et al. (2022)	HY-SRF05	Estudio realizado en canales de laboratorio. La distancia óptima entre el sensor y el nivel del agua debe ser de 0,55 m. Se obtuvo una exactitud del sensor entre 2,9 y 6%, solo se obtuvo un error del 7,7% en el escenario con más distancia entre el sensor y el nivel del agua y donde se presentó mayor fluctuación.
Rodrigues et al. (2022)	HC-SR04	Estudio realizado en canales de laboratorio. Las distancias menores a 0,2 m entre el sensor y el nivel del agua se obtuvo un error entre el 0,5 al 1,5% lo equivale a 1 a 3 mm de error. A una distancia de 0,4 m, se obtuvieron errores de 1 a 2%, lo que equivale entre 4 a 8 mm de error.
Presente estudio	US-100	Se encontró que en laboratorio el error fue menor al 0,6 cm, bajo zonas incluso de flujo turbulento. Por otro lado, las mediciones en campo dieron una desviación estándar de 1,39 cm por lo que tanto a escala de laboratorio como campo las mediciones están en el rango aceptable para hidrometría. Todo bajo distancias entre el sensor ultrasónico y el tirante de agua menores a 0,6 m.

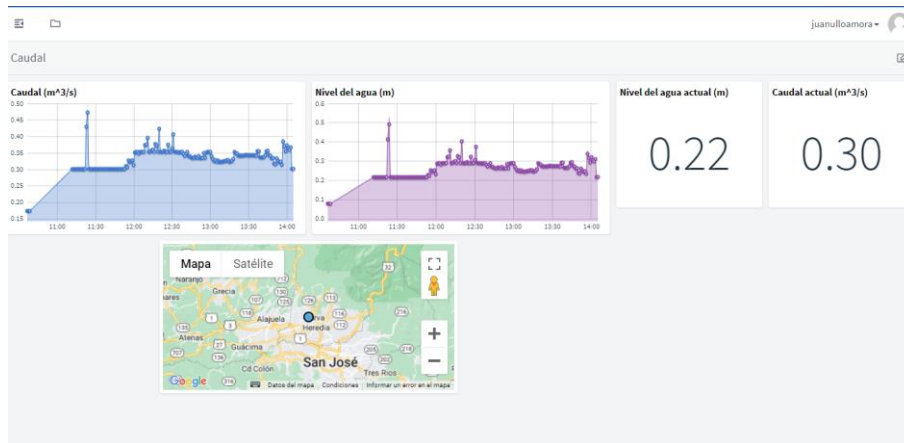
### 5.1.3. Montaje del sensor

#### 5.1.3.1 Programación

En el código final para el prototipo del sensor, se agregó al código la ecuación  $0,6975x^{0,55}$ , obtenida de la sección 5.7.2. la cual fue la curva de descarga que dio el mejor ajuste a los datos entre los caudales y tirantes de agua tomados en campos. Debido a que la plataforma Arduino IoT (usadas para las pruebas de campo), no permite almacenamiento gratuito en la nube por más tiempo que un día se decidió usar otra plataforma Thinger.io (figura 36) que permite el almacenamiento por más tiempo. Cada de la plataformas para gestión de dispositivos IoT en la nube tiene sus ventajas, mientras que Arduino IoT es más fácil de programar y es simplificada, Thinger.io permite utilizar mayores herramientas y más características en la interfaz.

Se debe recordar que el sensor ultrasónico, mide la distancia entre la posición del sensor y el espejo de agua, no el tirante del agua, razón por la cual se debe introducir en el código la ecuación 12. El valor introducido en el código como “*double altcamp = 1.80*” (que se relaciona con la ecuación 12), que corresponde a la distancia desde el sensor hasta la profundidad máxima del agua se debe verificar

en campo constantemente para prevenir errores en las mediciones a futuro. Otra modificación en el código es que se introdujo el modo sueño profundo (“deep sleep mode”), para minimizar el consumo de batería.



**Figura 36.** Interfaz Thinger.io y en funcionamiento el sensor ultrasónico.

### 5.1.3.2. Configuración en la plataforma Thinger.io

En los siguientes párrafos, se explica brevemente la configuración para la plataforma Thinger.io, para más detalles de esta se puede leer el manual que tiene en su página Web: <https://docs.thinger.io/coding-guide>. Primeramente, la persona usuaria debe crear un usuario que en este caso se llamó: “juanulloamora”, seguido se registra el dispositivo que se usará para la toma de datos (figura 37), en este caso se le llamó: “ESP32” como identificación. Luego se crea una credencial que la plataforma permite generar aleatoriamente, llamada: “Gvd+Q9HVM\$e-NMpN”. Esta información es importante ya que se tiene que agregar al código de programación (anexo 3), tal como se ve en las líneas de debajo del código. Seguido, se le crea un nombre al dispositivo que se llamó: “Juan”, para su uso del dispositivo en el entorno virtual y una descripción opcional.

```
#define usuario “juanulloamora”
```

```
#define device_Id “ESP32”
```

```
#define device_credentials “Gvd+Q9HVM$e-NMpN”
```

**Device Configuration**

Device Id ⓘ ESP32

Device Credentials ⓘ Enter device credentials

**Device Information**

Device Name ⓘ Juan

Device Description ⓘ Juan\_Trabajos

**Figura 37.** Introducción del dispositivo en Thingier.io.


Para el almacenamiento de los datos, se tiene que crear un “Data Bucket”, a este se le debe crear una identificación (ID) la cual se llamó: “DATOS\_ESP32”, para uso en el entorno virtual se le crea además un nombre: “ESP32” y una descripción opcional (figura 38). Seguido se elige una opción de recursos de los datos (“Data Source”), se eligió por los recursos del dispositivo (“From Device Resource”). Para entrar a detalle sobre cómo funciona esta configuración irse a: <https://docs.thingier.io/features/buckets>. Seguido se realiza la conexión con el nombre del dispositivo en este caso “Juan” (nombre que se le dio al dispositivo para su utilización en el entorno virtual). Seguido, se elige la selección del recurso (“Select Resource”), la cual es el nombre que se le llamó a la API, en el código de programación, la cual fue “esp32”, en el párrafo siguiente se coloca las líneas donde se debe colocar esta información en el código (anexo 3).


```
Thing.add_wifi(WiFi_ssid, WiFi_password);
thing[“esp32”] >> [(pson& out){
  out[“Altura_agua”] = altura;
  out[“Caudal”] = caudal1;
};
```


Seguidamente, se elige el intervalo de muestreo (“Sampling Interval”), se elige un 1 minuto, ya que es el mínimo tiempo que se puede en la versión gratuita. Con la introducción del dispositivo y el almacenamiento de datos, se tiene lo necesario para que la plataforma realice conexión con el ESP32 y almacene los datos, para luego ser descargados.





---


 **Bucket Settings**


Bucket Id 


 **Bucket Information**


Bucket Name 



Bucket Description 


 **Bucket Configuration**

Enabled 

Data Source 

 Select Device

 Select Resource 

 Refresh Mode

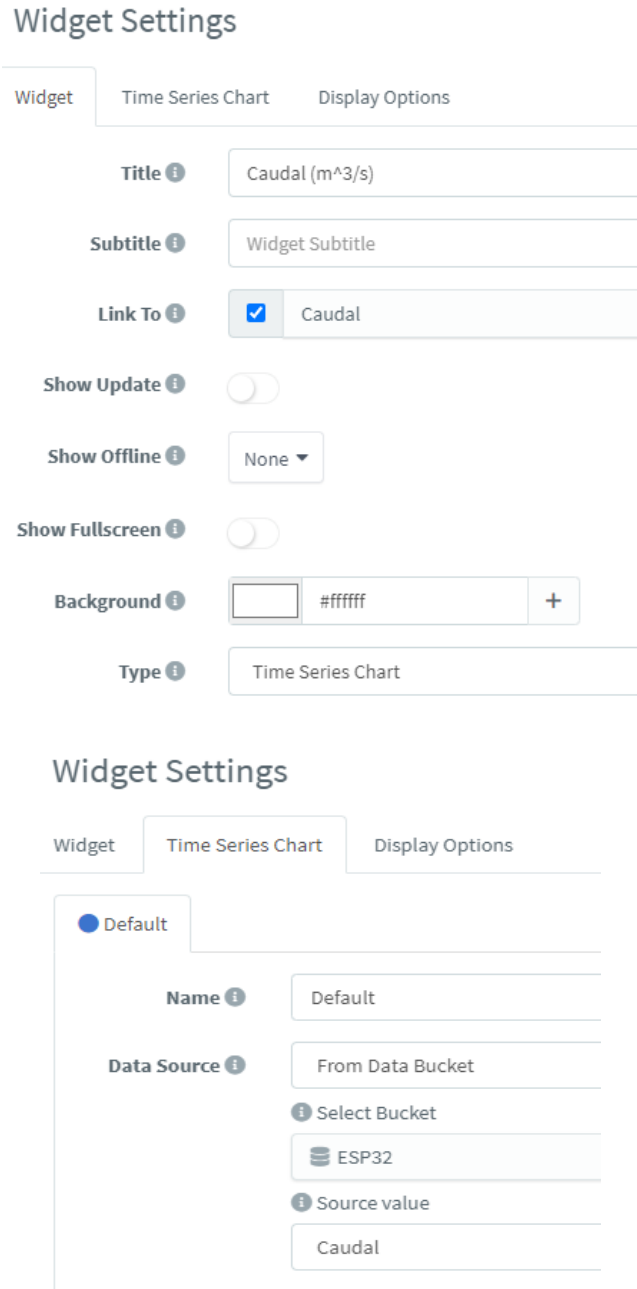
Sampling Interval ▾	1
---------------------	---

**Figura 38.** Introducción del almacenamiento de datos en Thinger.io.

Para la visualización de los datos (caudal y tirante de agua) en Thinger.io se necesita crear un tablero (“Dashboards”), para la introducción de artilugios (“Widgets”) se necesita posicionarse en el botón de agregar (“Add”) en el entorno virtual. Primeramente, en configuración de los artilugios (“Widget Settings”) se le elige la pestaña de artilugio (“Widget”). Para introducir gráficos (figura 39) se elige en el tipo de artilugio (“Type”) la gráfica de serie de tiempo (“Time Series Chart”). Seguido en la pestaña de gráfica de serie de tiempo (“Time Series Chart”), se le agrega un título a la gráfica (“Name”) y se enlaza al almacenamiento de los datos (“Data Source”) en este caso “ESP32”. Seguido se selecciona, el valor del dato que se quiere de ese almacenamiento en este caso (“Source Value”): “Caudal”.

Para el caso de agregar cuadros de texto con valores, se sigue el procedimiento anterior solo que en tipo de artilugio se le elige texto/valor (“Text/Value”) (figura 40). Ya en la pestaña de “Text/Value”, agrega un título al cuadro de texto (“Name”) y se enlaza al almacenamiento de los datos (“Data Source”) en este caso “ESP32”. Seguido se selecciona, el valor del dato que se quiere de ese almacenamiento en este caso (“Source Value”): “Altura\_agua”. Se puede personalizar más el tablero

con otras opciones que tiene Thingier.io por ejemplo mapas, para esto la persona lectora puede leer el manual de usuario de la página de Thingier.io.



**Figura 39.** Creación de gráficas de serie de tiempo en Thingier.io.

## Widget Settings

Widget	Text/Value	Display Options
<b>Title</b> ⓘ	Nivel del agua actual (m)	
<b>Subtitle</b> ⓘ	Widget Subtitle	
<b>Link To</b> ⓘ	<input checked="" type="checkbox"/>	Caudal

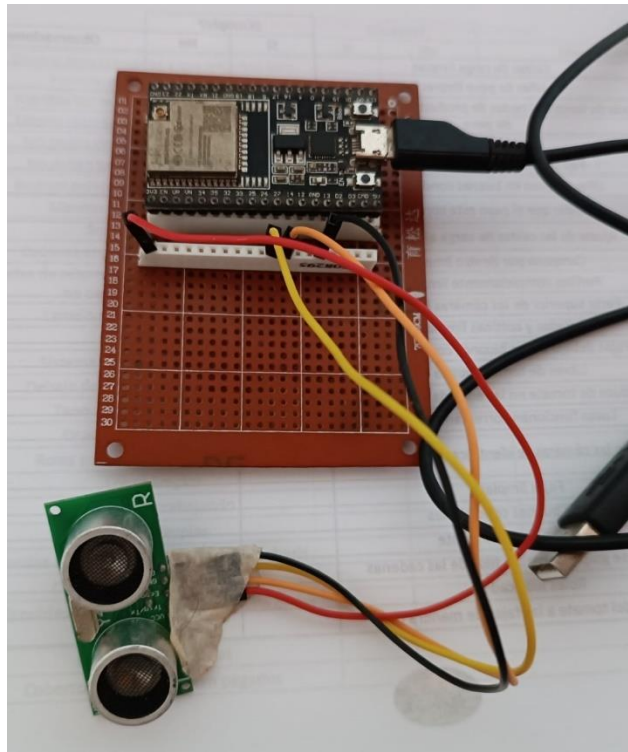
## Widget Settings

Widget	Text/Value	Display Options
<b>Data Source</b> ⓘ	From Data Bucket ▾	
ⓘ Select Bucket	ESP32 ▾	
ⓘ Source value	Altura_agua ▾	

**Figura 40.** Creación de botones en Thingier.io.

### 5.1.3.3 Montaje en físico

En la figura 41 a, se muestra el montaje del sensor en físico del sensor “SUTA” para su posterior puesto en campo. Las bases se soldaron en un placa de baquelita con huecos ya hechos, se soldaron las bases para conectar el ESP32-WROOM y el sensor ultrasónico US-100. Por practicidad, se eligió conectarlo a una batería de respaldo usada para celular (figura 41 b) de 12 000 mAh que puede suministrar energía por el período de 3 días y 9 horas, los cálculos se encuentran en el anexo teórico 4.



a)



b)

**Figura 41.** Montaje en físico del sensor a) montaje en placa del ESP32-WROOM-32U con el sensor ultrasónico US-100 y b) ESP32 conectado a la batería de respaldo.

### 5.1.3.5 Costos

En el cuadro 5, se encuentran los costos de los componentes electrónicos y el chasis para el montaje del sensor, lo cual suma un valor de 21 300 colones, el cual representa un valor económico bajo en comparación de sensores que se encuentran en el mercado.

**Cuadro 5.** Costos del sensor.

Dispositivo	Observaciones		Costo
ESP32-WROOM-U	Microprocesador	₡	3 500,00
US-100	Sensor ultrasónico	₡	800,00
Cables para la conexión		₡	500,00
Placa para soldar componentes		₡	1 000,00
Soldadura de estaño		₡	500,00
Chasis		₡	6 000,00
Batería de respaldo de 12 000 mAh		₡	9 000,00
	Costo total	₡	21 300,00

## 5.2. Balance hídrico

### 5.2.1. Área de los estanques

Para obtener el área del estanque 60, se tomó este como si fuera un rectángulo, se midieron sus lados: lado A (35,00 m) y lado C (31,20 m) como largos, lado B (30,00 m) y lado D (29,60 m) como anchos y se sacó un promedio de largo (30,40 m) y del ancho (32,50 m). Seguido se procedió a calcular el área (ecuación 35) y se realizó el mismo procedimiento para los estanques 71, 73 y 63. En el anexo 12 y 13, se encuentran los valores de los lados de cada estanque, así como un croquis de donde estaban ubicados estos y en el anexo 14, se encuentran largos y anchos promedio de los estanques 71, 60, 73 y 63.

$$A_{60} = 30,40 \text{ m} * 32,50 \text{ m} = 988,00 \text{ m}^2 \quad (35)$$

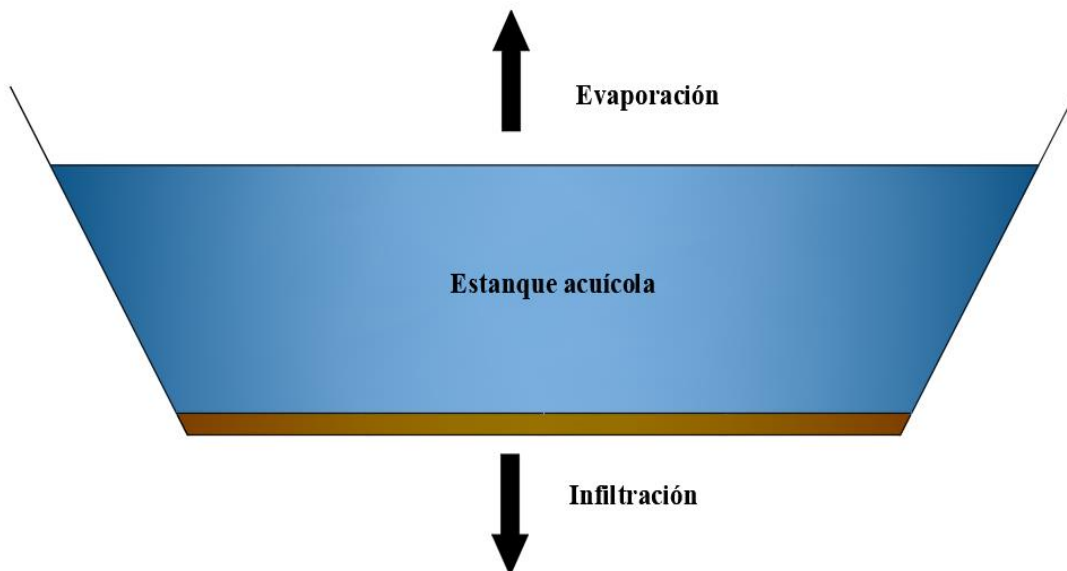
Con respecto a la toma de medidas del área del espejo de agua (cuadro 6), se encontró una diferencia entre -11,34% y 12,06 % en las áreas reportadas por el antiguo jefe de mantenimiento y las medidas en el presente año. En el anexo 15, se encuentran las áreas reportadas por el antiguo jefe de mantenimiento que corresponden a un total de 1 444 069 m<sup>2</sup>, que se usaron para cálculos posteriores. Una consideración a tomar es que los estanques no son del todo rectangulares, y se tomó como si fuera con esta figura geométrica por simplicidad. Por otro lado, se debe recordar que estos datos tienen más de 10 años de antigüedad, por lo que el área de los estanques pudo haber cambiado por procesos como la erosión y/o nivel de agua al tener paredes inclinadas en cada estanque.

**Cuadro 6.** Área reportada y medida de estanques en la “Finca Madre”.

# Estanque	Área reportada por la empresa (m <sup>2</sup> )	Área medida en campo (m <sup>2</sup> )	Diferencia (%)
71	4100	4203,43	2,46
60	1100	988,00	-11,34
73	8650	9836,64	12,06
63	8000	8501,89	5,90

### 5.2.2. Pérdidas de agua en los estanques

Según lo reportado por la empresa en los estanques acuícolas no se ha presentado ningún desbordamiento a lo largo de los años, igualmente en el período de estudio la precipitación es nula o poca y no hay presencia de escorrentía. Por otro lado, los afluentes de agua de los estanques se dirigen hacia los canales dentro de la finca y estos a las salidas del agua. En el caso de los efluentes, el agua que alimenta a los estanques proviene de las entradas de agua de la “entrada principal” y la “entrada de la III Etapa”, tanto las entradas como salidas se discuten en secciones más adelante. Por lo que la figura 1 en este estudio puede ser simplificada a la figura 42, donde las pérdidas en los estanques se deben a la evaporación y la infiltración.



**Figura 42.** Pérdidas consideradas en los estanques acuícolas.

### 5.2.3. Evaporación en los estanques

Para obtener la evapotranspiración mensual de marzo del 2021, se procedió a introducir los valores de temperatura máxima (34,20 °C), temperatura mínima (23,70 °C), humedad relativa promedio

(63,97%), velocidad del viento promedio (1,42 m/s) y horas Sol (9,80 h) en el programa CROPWAT 8.0 para obtener un valor de  $ET_0$  de 155,70 mm/mes. Se realizó el mismo procedimiento para los meses de marzo, abril y mayo entre el 2021 al 2023, en el cuadro 7, se muestran los valores obtenidos de  $ET_0$ , para los meses de estudio. Los valores meteorológicos obtenidos de la estación meteorológica propiedad de Aquacorporación Internacional se encuentran en el anexo 16. Seguido se procedió a obtener la evaporación en los estanques mediante la ecuación 19, por ejemplo, para el caso de marzo del 2021, se obtiene el siguiente resultado en la ecuación 35.

$$E_{E \text{ de marzo } 2021} = 0,81 * 155,70 \frac{mm}{mes} = 126,12 \frac{mm}{mes} \quad (35)$$

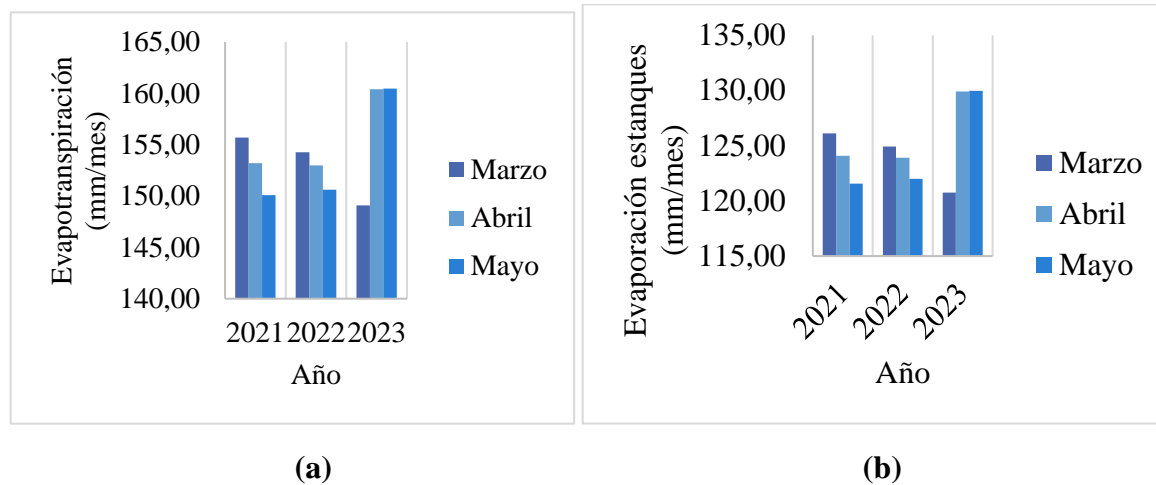
**Cuadro 7.** Evapotranspiración promedio y desviación estándar, según los datos registrados por la estación meteorológica ubicada en la Finca Madre del 2021 al 2023.

Año	2021	2022	2023		
Mes	$ET_0$ (mm/mes)			Promedio (mm/mes)	Desviación estándar ( $\pm$ mm/mes)
Marzo	155,70	154,24	149,09	153,01	3,47
Abril	153,21	152,97	160,39	155,52	4,22
Mayo	150,09	150,61	160,45	153,72	5,84

En el cuadro 8, se muestra los valores obtenidos de evaporación para los meses de estudio, donde se tiene valores promedios de 123,94  $\pm$ 2,81 mm/mes para marzo, 125,97  $\pm$ 3,42 mm/mes para abril y 124,51  $\pm$ 4,73 mm/mes para mayo. El mes con mayor evaporación fue abril (figura 43 (a)), el cual corresponde al mes con temperaturas y velocidades de viento mayores. En la figura 43 (b), además, se observa un aumento de la evapotranspiración para los meses de abril y mayo de 2023 con respecto a años anteriores para la estación meteorológica ubicada dentro de la empresa. Estos cambios se deben a los aumentos de temperatura mayores de los esperados para estos meses del año. La razón de esto se debe a factores como la dirección del viento, la oscilación de la temperatura del Mar Caribe y la llegada del Fenómeno del Niño- Oscilación del Sur (ENOS) (Hernández & Montero, 2023).

**Cuadro 8.** Evaporación en los estanques promedio y desviación estándar de los estanques, según los datos registrados por la estación meteorológica ubicada en la Finca Madre del 2021 al 2023.

Año	2021	2022	2023		
Mes	Evaporación estanques (mm/mes)			Promedio (mm/mes)	Desviación estándar ( $\pm$ mm/mes)
Marzo	126,12	124,93	120,76	123,94	2,81
Abril	124,1	123,91	129,92	125,97	3,42
Mayo	121,57	121,99	129,96	124,51	4,73



**Figura 43.** Evapotranspiración (a) y evaporación en los estanques (b), según los datos registrados por la estación meteorológica ubicada en la Finca Madre del 2021 al 2023.

Para obtener el volumen de agua perdido por evaporación en los estanques se utilizó las ecuaciones 16 y 17, como ejemplo se muestra el resultado del mes de marzo, se encuentra en la ecuación 36, seguido se pasó los datos de  $m^3$  a  $Hm^3$  (ecuación 37). Se realizó el mismo procedimiento para los meses de abril y mayo, en el anexo 12 se muestran los datos para los tres meses de estudio. En el cuadro 9, se observa las pérdidas por evaporación en los estanques acuícolas que corresponden para el caso 1 de  $0,18 Hm^3$ ,  $0,18 Hm^3$  y  $0,18 Hm^3$  para marzo, abril y mayo respectivamente.

$$V(Ee\ marzo) = \left(\frac{1\ m}{1000\ mm}\right) * 123,94\ \frac{mm}{mes} * 1\ 444\ 069\ m^2 = 178\ 975,17\ \frac{m^3}{mes} \quad (36)$$

$$178\ 975,17\ \frac{m^3}{mes} * \left(\frac{1}{100}\right)^3 = 0,18\ Hm^3 \quad (37)$$

**Cuadro 9.** Volumen de agua perdido para los meses de marzo, abril y mayo para los dos casos debido a la evaporación de los estanques.

	Evaporación en los estanques ( $E_e$ )			
	Espejo total de agua (Ha)	Volumen de agua perdido marzo ( $Hm^3/mes$ )	Volumen de agua perdido abril ( $Hm^3/mes$ )	Volumen de agua perdido mayo ( $Hm^3/mes$ )
“Finca Madre”	144,41	0,18	0,18	0,18

#### 5.2.4. Infiltración en los estanques

En el caso de la infiltración, en la figura 44, se observa que la mayoría de las repeticiones de la prueba de infiltración (valores debajo de las barras), se encuentran entre 0 a 78 mm/día, lo cual según criterios de Boyd & Gross (2000), corresponden a una infiltración extrema ( $>15$  mm/día) para estanques acuícolas. Por otro lado, un coeficiente de permeabilidad cercano a los 80 mm/día,



corresponde a suelos de tipo franco arcillosos (FAO, 2006), y según información suministrada por la empresa, indican que la “Finca Madre”, posee suelos con textura de este tipo.

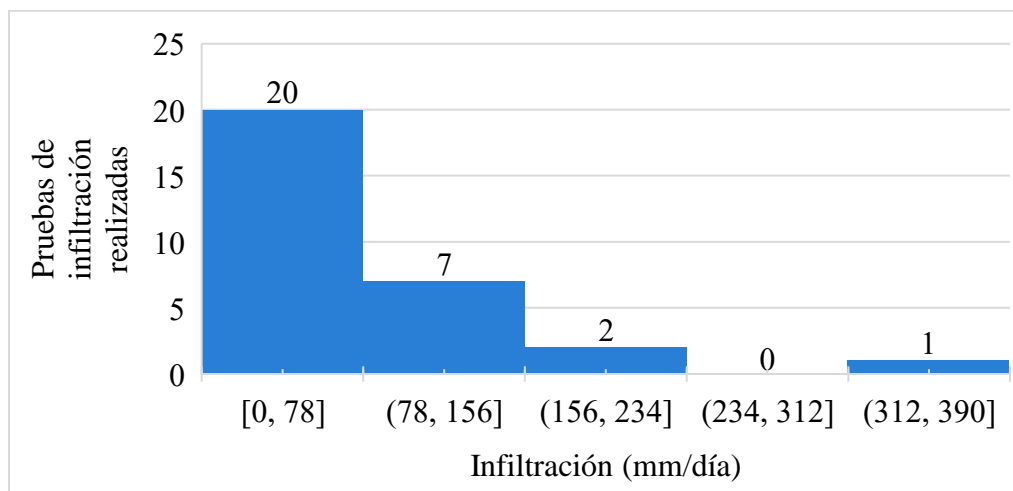
Para obtener el valor infiltración del estanque 535, se utilizó la ecuación 18. En la primera repetición y lectura, el radio del estanque era de 15 cm. Al empezar la prueba la altura del agua era 27,70 cm pasados 5 minutos era de 27,50 cm. El valor obtenido de infiltración (ecuación 38) es de 0,01 cm/min, seguido se pasó a mm/h (ecuación 39) para obtener un valor de 5,13 mm/h.

$$k = \frac{15 \text{ cm}}{2(5 \text{ min} - 0 \text{ min})} \ln \left( \frac{15 \text{ cm} + 2 * 27,70 \text{ cm}}{15 \text{ cm} + 2 * 27,50 \text{ cm}} \right) = 0,01 \frac{\text{cm}}{\text{min}} \quad (38)$$

$$0,01 \frac{\text{cm}}{\text{min}} * \frac{60 \text{ min}}{1 \text{ hora}} * \frac{10 \text{ mm}}{1 \text{ cm}} = 5,13 \frac{\text{mm}}{\text{h}} \quad (39)$$

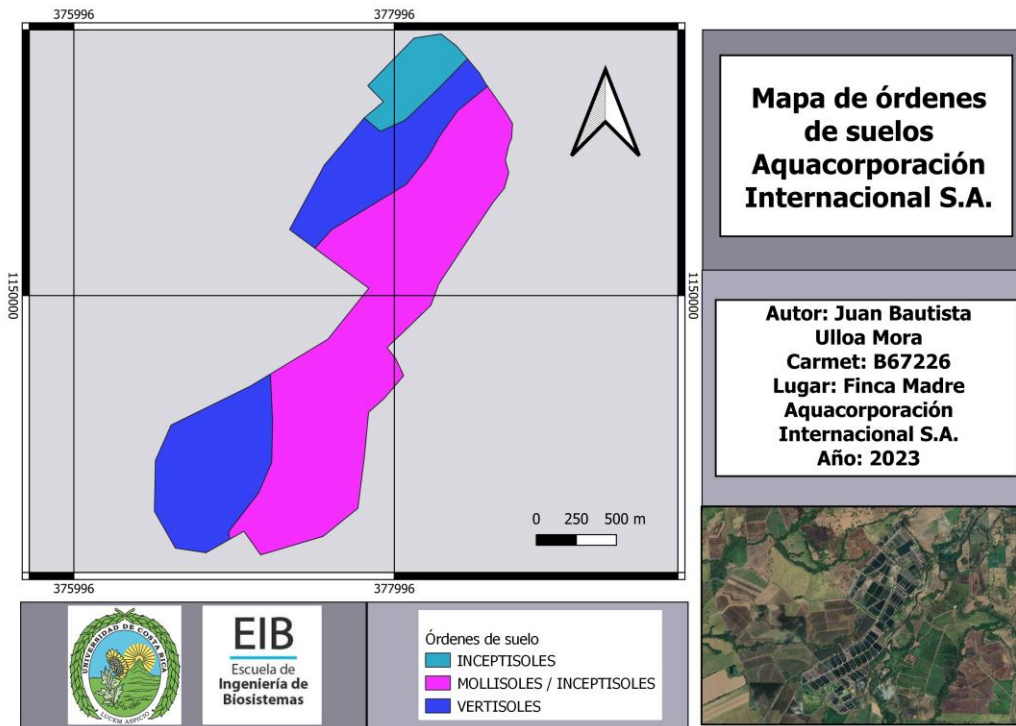
Este mismo procedimiento se realizó cada 5 minutos para obtener un nuevo valor de “k” hasta llegar a los 60 min, por lo que se tienen 12 repeticiones que dieron un promedio de 2,38 mm/h. Seguido se pasó este valor a cm/mes (ecuación 40) el cual dio como resultado 171,44 cm/mes. Se realizó el mismo procedimiento para las tres repeticiones de la prueba de infiltración a cada estanque, en los anexos del 17 al 26, se muestra los datos para la realización de estas.

$$2,38 \frac{\text{mm}}{\text{h}} * \frac{24 \text{ h}}{1 \text{ día}} * \frac{30 \text{ días}}{\text{mes}} * \frac{1 \text{ cm}}{10 \text{ mm}} = 171,44 \frac{\text{cm}}{\text{mes}} \quad (40)$$

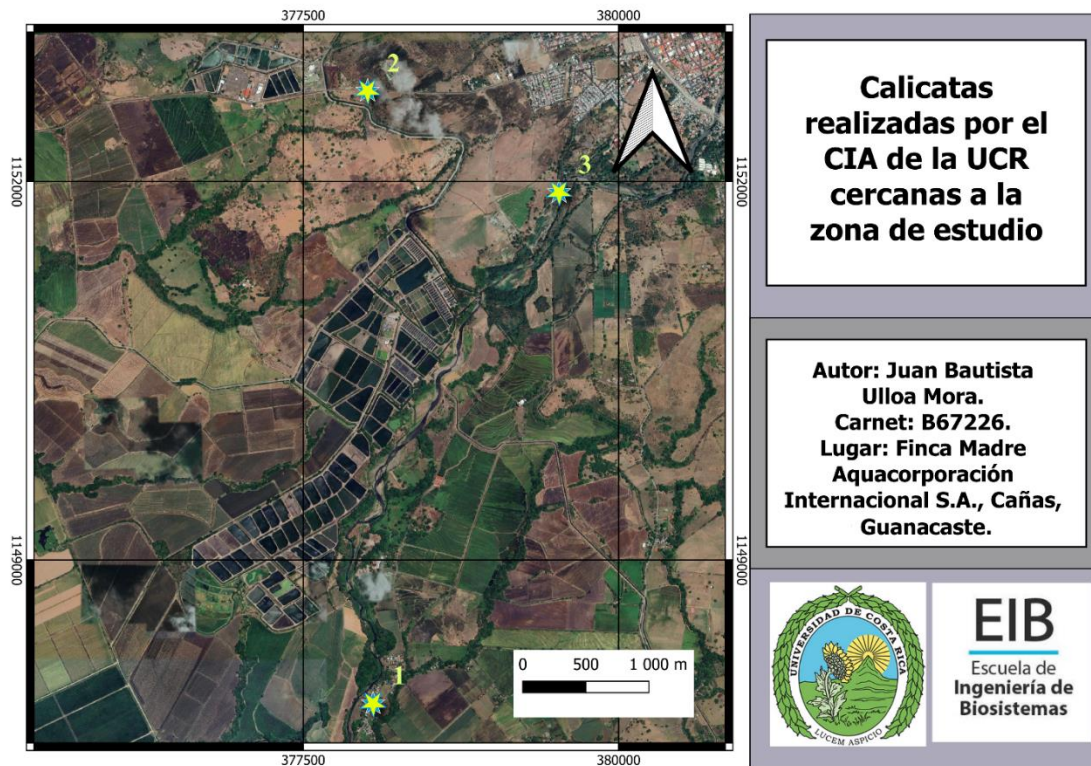


**Figura 44.** Distribución de las pruebas de infiltración hechas. Nota: un paréntesis cuadrado indica que el valor si se encuentra dentro del rango mientras que un paréntesis redondo indica que el valor no se encuentra dentro del rango.

Según el Mapa de Orden de Suelos de Costa Rica del centro de Investigaciones Agronómicas de la Universidad de Costa Rica (CIA) (2020) (figura 45) los estanques se encuentran en zonas con suelos de orden vertisol o inceptisoles/molisol, según la base de datos del CIA (2020) (figura 46 y cuadro 10) en las calicatas más cercanas se tiene en el horizonte A una textura franco/ franco arcillosa y los siguientes horizontes textura arcillosa, además, los suelos de las calicatas era del orden inceptisol o molisol.



**Figura 45.** Orden de suelos en Aquacorporación Internacional S.A.



**Figura 46.** Calicatas elaboradas por el CIA (2020) cercanas a la zona de estudio. Las estrellas amarillas indican donde se realizó las calicatas.

**Cuadro 10.** Calicatas más cercanas elaboradas por el CIA (2020) cercanas a la zona de estudio.

	<b>Longitud</b>	<b>Latitud</b>	<b>Drenaje</b>	<b>Orden</b>	<b>Textura suelo horizonte A/Ab</b>
Punto 1	- 85,11361111	10,3788888 9	Bueno	Molisoles	Franco/Franco Arcilloso
Punto 2	- 85,11416667	10,4227777 8	Moderadamente Excesivo	Inceptisoles	Franco/Franco Arcilloso
Punto 3	- 85,10027778	10,4155555 6	Moderadamente Excesivo	Inceptisoles	Franco/Franco Arcilloso

El coeficiente de permeabilidad “k” promedio de los estanques se encontró entre 14,19 a 178,49 mm/día (cuadro 11), para un promedio total de  $68,86 \pm 42,95$  mm/día. Existe una gran variabilidad en las mediciones del coeficiente de permeabilidad inclusive en los mismos estanques, esto se ve en las desviaciones estándares que van desde  $\pm 4,57$  mm/día para el estanque 525 hasta  $\pm 157,88$  mm/día para el estanque 520. Por otro lado, sí existen diferencias significativas en el coeficiente de permeabilidad de los estanques dentro de toda la finca ( $p < 0,05$ ) (anexo 11). Esto es un resultado esperado ya que según Stone & Boyd (1989), en los estanques acuícolas existe una gran variabilidad en las tasas de infiltración, que se pueden presentar en una misma localización, por lo que no recomiendan usar el valor promedio para toda la zona de estudio ya que puede dar datos inexactos.

**Cuadro 11.** Coeficiente de permeabilidad promedio en los estanques que se les realizó la prueba de Porchet.

<b>Estanque</b>	<b>Infiltración promedio (mm/día)</b>	<b>Desviación estándar (<math>\pm</math> mm/día)</b>	<b>Estanque</b>	<b>Infiltración promedio (mm/día)</b>	<b>Desviación estándar (<math>\pm</math> mm/día)</b>
94	124,90	30,26	160	53,03	26,74
167	81,86	71,35	526	34,19	48,87
535	92,85	38,87	526	34,19	48,87
60	14,19	15,78	520	178,49	157,88
34	51,15	6,51	176	43,08	23,47
525	49,57	4,57	<b>Total</b>	<b>68,86</b>	<b>42,95</b>
160	53,03	26,74			

Boyd (1982) encontró que los estanques con menores tasas de infiltración eran los que se encontraban rodeados de otros estanques, mientras que los estanques con mayores tasas de infiltración eran los que no estaban adyacentes con otros. Stone & Boyd (1989), explican que las diferencias de profundidad, nivel del agua y la elevación del estanque causan variación en la infiltración, esta puede disminuir por la entrada de agua de un estanque colindante. Por otro lado, la infiltración podría

aumentar por el vacío de un estanque adyacente. Ya que el nivel freático, va aumentando en elevación desde los estanques del exterior hasta los que se encuentran en el centro (Boyd, 1982).

Una consideración para tomar en cuenta es que los estanques generalmente se construyen en bloques, como es el caso de la finca donde se realizó el trabajo mencionado, por lo que estanques adyacentes no interactúan enteramente como unidades independientes, por ejemplo, la infiltración puede aumentar si un estanque cercano se encuentra vacío (Stone & Boyd, 1989). En la figura 50, se muestra la “Finca Madre” en tres divisiones, en la división 1 que corresponde a la Finca A, en la cual se encuentra la mayoría de los estanques intensivos y se recibe agua de primer uso (o sea agua proveniente directamente de los canales). La división 2 corresponde a la Finca B (lado derecho) y Finca Heyson (lado izquierdo) que, aunque hay tanques intensivos estos reciben aguas de segundo y tercer uso. Por último, la división 3 corresponde a la Finca Santa Paula que corresponde a una finca semi-intensiva, con estanques acuícolas de más de 1,5 Ha y se utilizan aguas de cuarto uso.

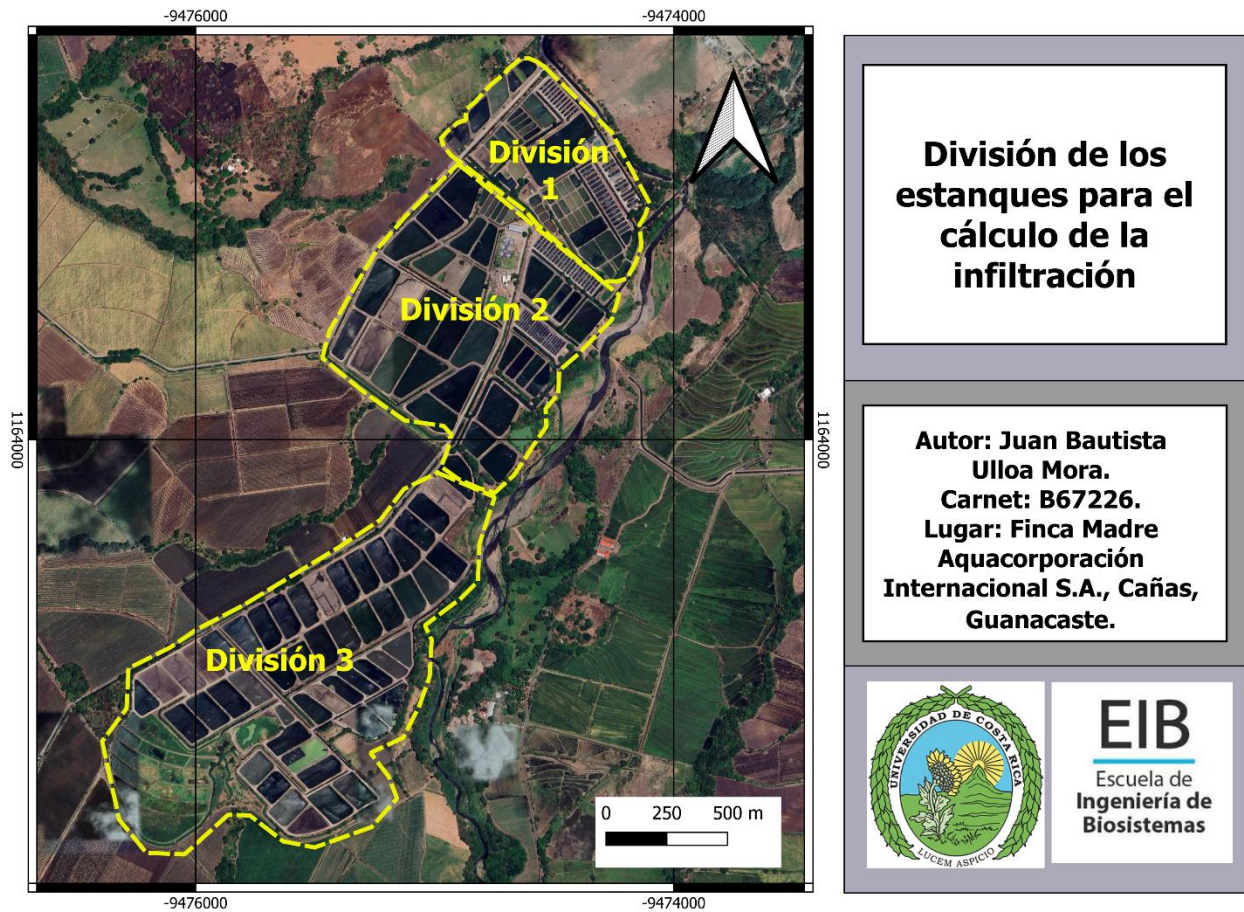
Pese a que la infiltración es muy variable entre los estanques, se decidió trabajar la infiltración en estos mediante las divisiones anteriormente citadas, ya que en estas se encuentran estanques de un mismo uso o agua ya sea de primer, segundo, tercer o cuarto uso. La división 1 correspondió a un área de espejo de agua de 50 420 m<sup>2</sup>, la división 2 de 630 499 m<sup>2</sup> y la división 3 de 709 800 m<sup>2</sup>. Para el cálculo del volumen perdido por infiltración en la división 1, primeramente, se calculó el valor promedio de los coeficientes de permeabilidad que corresponden a los tres valores del coeficiente de permeabilidad obtenidos en el estanque 60, 94 y 34 (anexo 27) para un valor de 63,41 mm/día. Seguido se pasó este valor a m/mes (ecuación 41) y seguido se multiplicó el área de la división 1 por el coeficiente de permeabilidad anteriormente citado (ecuación 42) para obtener un volumen de agua igual a 0,096 Hm<sup>3</sup>/mes. Se realizó el mismo procedimiento para las otras dos divisiones. En el cuadro 12, se obtiene que las pérdidas por infiltración en los estanques por mes es en la división 1 de 0,096 Hm<sup>3</sup>, en la división 2 de 1,122 Hm<sup>3</sup> y de 1,890 Hm<sup>3</sup>, para un total de 3,11 Hm<sup>3</sup>.

$$63,41 \frac{mm}{día} * \frac{30 \text{ días}}{1 \text{ mes}} * \frac{1 \text{ m}}{(1000 \text{ mm})} = 1,902 \frac{m}{mes} \quad (41)$$

$$1,902 \frac{m}{mes} * 50 \ 420 \ m^2 = 95 \ 921,11 \frac{m^3}{mes} \text{ ó } 0,096 \frac{Hm^3}{mes} \quad (42)$$

**Cuadro 12.** División de estanques y pérdidas por infiltración en cada división.

	<b>Estanques donde se aplicó pruebas de infiltración</b>	<b>Promedio coeficiente de permeabilidad (mm/día)</b>	<b>Coficiente de permeabilidad (m/mes)</b>	<b>Área espejo de agua (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Volumen de agua perdido infiltración (m<sup>3</sup>/mes)</b>	<b>Volumen de agua perdido infiltración (Hm<sup>3</sup>/mes)</b>
1 división	60,94,34	63,41	1,9024416	50420	95921,11	0,096
2 división	176,167,160	59,32	1,7796739	630499	1122082,61	1,122
3 división	520,525,526,535	88,78	2,6632559	709800	1890379,04	1,890
			<b>Total</b>		3108382,76	3,11



**Figura 47.** División de la finca para estimar el coeficiente de permeabilidad. Las zonas delimitadas en amarillo son las zonas que se dividió la “Finca Madre”.

La composición química del suelo o la forma en que se construyeron los estanques al inicio, afectan los coeficientes de permeabilidad. Dependiendo de la zona que se visitaba dentro de la “Finca Madre” algunos estanques poseían gran cantidad de conchas, restos de peces, entre otros (figura 51 a), mientras que otros poseían muy poca cantidad de materia orgánica (figura 51 b). En un estanque acuícola la materia orgánica va tapando los poros del suelo, de este modo reduciendo su permeabilidad (FAO, 2006). Por lo que, se podría ver la relación que existe entre la materia orgánica y la infiltración en los estanques.



**48.a**



**48.b**

**Figura 48.** a) Ejemplo de estanque con gran cantidad de materia orgánica (al costado derecho) y b) ejemplo de estanque con poca cantidad de materia orgánica.

Teichert-Coddington et al., (1988) realizaron un estudio en Chiriquí, Panamá, donde se reportó que un 87% de las pérdidas en los estanques se debieron por infiltración. Los suelos se clasificaron como aluviales (inceptisoles) que son ácidos y de gran permeabilidad. Los investigadores concluyeron que no solo las altas tasas de infiltración se deben a suelos de gran permeabilidad, sino también la calidad con la que se construyó los estanques influencia estas altas tasas de infiltración (Teichert-Coddington et al., 1988). Uzukwu et al. (2011) también reportaron problemas de infiltración debido a la composición del suelo, por una capa de suelos lateríticos. En la “Finca Madre” no se tienen estudios de la composición fisicoquímica del suelo por lo que se podría realizar análisis a futuro de esta índole.

Stone & Boyd (1989), encontraron que la tasa de infiltración se va reduciendo a lo largo de los años y se espera que se estabilice en algún momento. Se encontró por ejemplo que la infiltración 4 años después era casi idéntica, en estanques acuícolas en la Universidad de Auburn en Alabama. Los estanques acuícolas dentro de la “Finca Madre” tienen más de 30 años de haberse construido, por lo que una razón de las altas infiltraciones no es por ser estanques nuevos.

Uzukwu et al. (2011) encontraron que los problemas de infiltración se pueden empeorar si hay un suministro inadecuado de agua a lo largo de los años, con grandes períodos que los estanques se encuentren secos, ocasionando grietas, meteorización física y química del subsuelo ocasionando la destrucción de la estructura del subsuelo. En la zona de estudio se reportó que había estanques que tenían incluso un mes sin agua, por lo que estas circunstancias pudieron aumentar las tasas de infiltración.

Además, se debe considerar que la infiltración en época seca es mayor que en época lluviosa, caso que no se consideró en este estudio. Por ejemplo, Green & Boyd (1995) encontraron una reducción de la infiltración en época lluviosa del 25% comparada a la época seca en estanques acuícolas en clima tropical seco en El Carao, Honduras y Kipkemboi et al. (2007) encontraron una reducción entre el 20 al 25% en la época lluviosa. Por lo que, para futuros estudios se podría realizar tomas de infiltración en época lluviosa. Por último, en el cuadro 13, se muestra una comparativa entre otros estudios realizados en estanques acuícolas y los resultados de la evaporación e infiltración en las zonas de estudio.

**Cuadro 13.** Infiltración y evaporación reportado en estudios sobre balances hídricos en estanques acuícolas.

Estudio	Infiltración reportada	Evaporación reportada	Observaciones
Presente estudio	Se encontró entre 14,19 a 178,49 mm/día.	Se encontró entre 4,13 mm/día a 4,19 mm/día.	Estudio realizado en Cañas, Guanacaste. Clima tropical seco. Problemas de infiltración en los estanques acuícolas. Cultivo de <i>Oreochromis nilotica</i> .
Green & Boyd (1995)	16,5 ±6,6 cm/mes (estudio 1) y 19,2 ±5,1 cm/mes (estudio 2)	3,3 a 12,9 cm/mes (estudio 1) y 1,8 a 18 cm/mes (estudio 2)	Estudio realizado en Comayagua, Honduras, zona con clima tropical seco. Estudio 1 en época lluviosa y estudio 2 en época seca.
Adhikari et al. (2016)	5,7 ±1,2 cm/mes a 9 ±10,9 cm/mes	12,3 a 14,7 cm/mes	Estudio realizado en Odisha, Andhra Pradesh y Bengala Occidental en la India. Clima tropical húmedo en algunas zonas. Cultivo de <i>Labeo rohita</i> , <i>Catla Catla</i> , and <i>Cirrhinus mrigala</i> .
Kipkemboi et al. (2007)	1,8 ±1,6 mm/día a 4,9 ±2,7 mm/día	2,6 mm/día a 4,0 mm/día	Estudio realizado en el Lago Victoria, Kenya. Se cultiva principalmente especies de tilapia entre ellas, <i>Oreochromis nilotica</i> .
Teichert-Coddington et al., (1988)	19 a 58 mm/día	1,2 mm/día en época lluviosa a 10,6 mm/día en época seca	Estudio realizado en Gualaca, Panamá. Cultivo de <i>Tilapia nilotica</i> en suelos inceptisoles y ultisoles.
Sharma et al. (2013)	1,10 ±0,20 mm/día a 14,26 ±1,50 mm/día	0,20 ±0,05 mm/día a 5,96 ±0,75 mm/día	Estudio realizado en Odisha, India. Producción semi-intensiva.
Braaten & Flaherty (2000)	23 a 69 mm/día (estanques) y 20 a 90 mm/día (reservorios)	16 a 51 mm/día	Estudio realizado en la Llanura Central de Tailandia, cultivo de langostino <i>Penaeus monodon</i> .
Boyd (1982)	12 a 20,3 mm/día	1,16 a 6 mm/día	Estudio realizado en Auburn, Alabama. Cultivo de mojarra <i>Lepomis macrochirus</i> y pez gato americano <i>Ictalurus punctatus</i> .

### 5.2.5. Pérdidas en los canales

#### 5.2.5.1. Muestro de tirantes de agua

En el cuadro 14, se muestran los canales que se les midió tanto su ancho como su tirante de agua, en la finca se tenían tanto canales de conducción como de drenaje (figura 49). La mayoría de canales con ancho mayor a 10 m correspondían a canales y drenaje y poseían un tirante menor a 0,5 m. Los canales entre 5 y 10 m, que en su mayoría era de conducción de agua hacia los estanques y las salidas

del agua, tienen los tirantes de agua mayor muchos por encima de 1 m. Mientras que los canales menores a 5 m, su mayoría poseían un tirante de agua que se encontraba entre 0,4 a 0,6 m.

Con esta información, se procedió a dividir los canales en tres categorías los de ancho menor a 5 m, ancho mayor a 10 m y ancho entre 5 a 10 m. A cada categoría (cuadro 15) se le asignó un tirante de agua promedio de 0,50 m para los menores a 5 m, 1,00 m para los mayores a 5 m, pero menores a 10 m y 0,50 m para los mayores a 10 m. Estos valores se toman calculando el promedio de los tirantes de agua de los canales medidos en campo incluidos en cada categoría y por último se redondeó el promedio.

**Cuadro 14.** Medición de ancho y altura de canales dentro de la “Finca Madre”.

	<b>Tipo</b>	<b>Ancho (m)</b>	<b>Tirante de agua (m)</b>
Canal cercano al 170	Conducción	5	0,4
Canal entre 68 y 69	Drenaje	3	0,38
Canal Whole Foods	Drenaje	9	1
Canal 171 lado superior	Conducción	5	0,15
Canal entrada principal	Conducción	9	1,5
Canal por genética vertical #1	Conducción	3	0,51
Canal por genética vertical #2	Conducción	3	0,65
Canal por genética horizontal #1	Drenaje	11	0,4
Canal por genética horizontal #2	Drenaje	11	0,43



**49.a**





49.b

**Figura 49.** Canales de a) drenaje y b) conducción de agua dentro de la “Finca Madre”.

**Cuadro 15.** Categorías de canales y su altura promedio.

	<b>Tirante de agua promedio <math>T_c</math> (m)</b>	<b><math>T_c</math> (m)</b>	<b><math>T_c</math> redondeado (m)</b>
Canales ancho < 5 m	$T_c = (0,38 \text{ m} + 0,51 \text{ m} + 0,65 \text{ m})/3$	0,51	0,5
Canales ancho 5 m < x < 10 m	$T_c = (0,4 \text{ m} + 1,00 \text{ m} + 1,50 \text{ m})/3$	0,97	1
Canales ancho > 10 m	$T_c = (0,40 \text{ m} + 0,43 \text{ m})/2$	0,41	0,5

#### 5.2.5.2. Pérdidas por evaporación e infiltración en los canales

Para el cálculo de las pérdidas en los canales se utilizó las ecuaciones de la 21 a la 25. Se usa como ejemplo el canal denotado con la letra A en la figura 24, que posee un ancho promedio 10,095 m y un largo promedio de 399,055 m, posee una pendiente “z” de 1 y un tirante de agua de 0,5 m (según cuadro 15). Se procede a calcular su perímetro mojado igual a 11,51 m (ecuación 43), su área mojada (ecuación 44) igual a 5,30 m<sup>2</sup>, para obtener mediante la ecuación 45 las pérdidas por infiltración en este canal iguales a 0,017 m<sup>3</sup>/(s\*km). Se usó una constante “C” de 0,0022 correspondiente a suelos franco arcillosos (según la sección 5.2.4.).

Seguido se prosiguió a calcular el caudal perdido mediante la ecuación 46, para un resultado de 0,0068 m<sup>3</sup>/s, posteriormente se calcula el volumen de agua perdido al igual a 17 590,31 m<sup>3</sup> (ecuación 47). Para el caso de la pérdidas por evaporación, se usó las ecuaciones 48, 49 y 50, donde se obtiene un valor de pérdidas por evaporación en este canal de 610,22 m<sup>3</sup> para marzo, 620,24 m<sup>3</sup> para abril y 613,03 m<sup>3</sup> para mayo. Los datos de evaporación (mm/mes) se obtuvieron de la sección 5.2.3., cuadro 9. Este mismo procedimiento se realiza para todos los canales medidos, y así obtener el volumen total de agua perdido por infiltración y evaporación en los canales, en los anexos 28 y 29, se muestra la memoria de cálculo de todos los canales.

$$P_{m-canal} = 10,095 \text{ m} + 2 * 0,5 \text{ m} * \sqrt{1 + 1^2} = 11,51 \text{ m} \quad (43)$$

$$A_{m-canal} = (10,095 \text{ m} + 1 * 0,5 \text{ m}) * 0,5 \text{ m} = 5,30 \text{ m}^2 \quad (44)$$

$$S_{canal} = 0,022 * \sqrt{11,51 \text{ m}} * \sqrt{5,30 \text{ m}^2} = 0,017 \frac{\text{m}^3}{\text{s} * \text{km}} \quad (45)$$

$$Q_{pc-canal} = 0,017 \frac{\text{m}^3}{\text{s} * \text{km}} * \left( 399,06 \text{ m} * \frac{1 \text{ km}}{1000 \text{ m}} \right) = 0,0068 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \quad (46)$$

$$V_{ic-canal} = 0,0068 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} * \left( \frac{60 \text{ s}}{1 \text{ min}} \right) * \left( \frac{60 \text{ min}}{1 \text{ h}} \right) * \left( \frac{24 \text{ h}}{1 \text{ día}} \right) * \left( \frac{30 \text{ días}}{1 \text{ mes}} \right) = 17 590,31 \text{ m}^3 / \text{mes} \quad (47)$$

$$\begin{aligned} V_{ec-canal-marzo} &= 10,095 \text{ m} * 399,055 \text{ m} * 153,01 \frac{\text{mm}}{\text{mes}} * \left( \frac{1 \text{ m}}{1000 \text{ mm}} \right) \\ &= 610,22 \text{ m}^3 / \text{mes} \end{aligned} \quad (48)$$

$$\begin{aligned} V_{ec-canal-abril} &= 10,095 \text{ m} * 399,055 \text{ m} * 155,52 \frac{\text{mm}}{\text{mes}} * \left( \frac{1 \text{ m}}{1000 \text{ mm}} \right) \\ &= 620,24 \text{ m}^3 / \text{mes} \end{aligned} \quad (49)$$

$$\begin{aligned} V_{ec-canal-mayo} &= 10,095 \text{ m} * 399,055 \text{ m} * 153,72 \frac{\text{mm}}{\text{mes}} * \left( \frac{1 \text{ m}}{1000 \text{ mm}} \right) \\ &= 613,03 \text{ m}^3 / \text{mes} \end{aligned} \quad (50)$$

Para el caso de la "Finca Madre" (cuadro 16) se tiene una red de canales entre conducción y drenaje de 20,72 km de longitud total (anexo 28). Con respecto a las pérdidas por infiltración se tiene un total de 0,77 Hm<sup>3</sup> al mes, mientras que para el caso de la evaporación en los canales se tiene un total de 0,024 Hm<sup>3</sup>, 0,025 Hm<sup>3</sup> y 0,024 Hm<sup>3</sup> para los meses de marzo, abril y mayo respectivamente. Para un total de 0,80 Hm<sup>3</sup> para todos los meses de estudio en volumen de agua perdido en los canales.

**Cuadro 16.** Pérdidas en los canales de conducción y drenaje en la "Finca Madre".

Largo total canales (km)	Volumen agua perdido infiltración (Hm <sup>3</sup> )	Marzo	Abril	Mayo
		Volumen de agua perdido al mes evaporación (Hm <sup>3</sup> )	Volumen de agua perdido al mes evaporación (Hm <sup>3</sup> )	Volumen de agua perdido al mes evaporación (Hm <sup>3</sup> )
20,72	0,77	0,024	0,025	0,024
		Volumen total perdido marzo (Hm <sup>3</sup> )	Volumen total perdido abril (Hm <sup>3</sup> )	Volumen total perdido mayo (Hm <sup>3</sup> )
		0,80	0,80	0,80

### 5.2.3. Estimación de las pérdidas de agua dentro de la Finca Madre

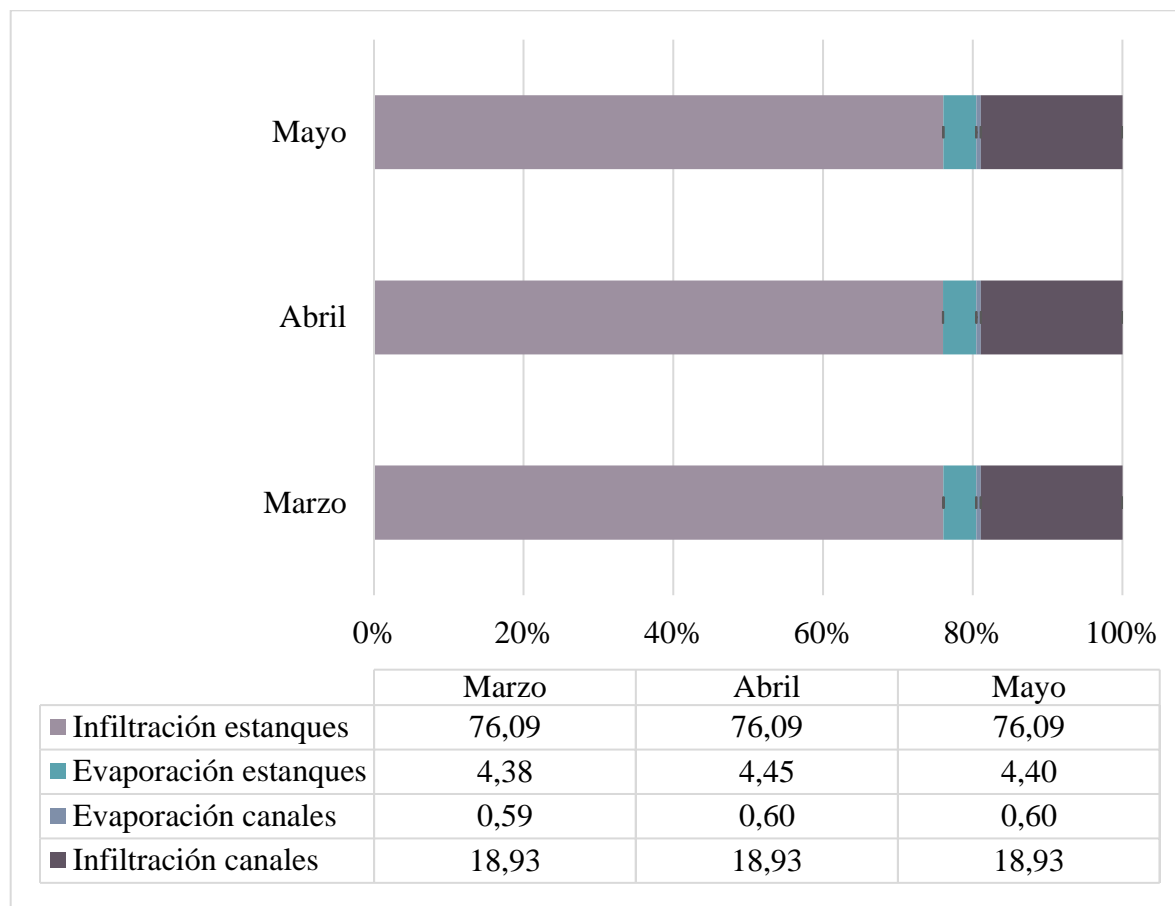
En la figura 32 y cuadro 14, se presentan los volúmenes totales de entrada y perdidos de agua y su respectivo porcentaje, para los meses de marzo, abril y mayo en la Finca madre sin considerar el caudal de agua que sale por las compuertas al canal del Sur del SENARA. El caudal de entrada se obtiene al pasar el valor teórico de 8 m<sup>3</sup>/s dado por SENARA a m<sup>3</sup>/mes (ecuación 51), mientras que los valores de las pérdidas se obtienen de las secciones 5.2.3.,5.2.4. y 5.2.4.5.

$$8 \frac{m^3}{s} * \frac{60 s}{1 min} * \frac{60 min}{1 h} * \frac{24 h}{1 día} * \frac{30 días}{1 mes} = 20\,736\,000 \frac{m^3}{mes} \text{ ó } 20,74 \frac{Hm^3}{mes} \quad (51)$$

El total de volumen de agua perdido corresponden entre 4,08 a 4,09 Hm<sup>3</sup> al mes (cuadro 17). En la figura 50, se muestra que un 76,09% del 100% de las pérdidas corresponde a pérdidas por infiltración en los estanques, siendo la mayor pérdida dentro de la zona de estudio y entre un 4,38 a 4,45% que corresponde a pérdidas por evaporación en los estanques. Para el caso de los canales, un 18,93% del total representa pérdidas por infiltración y entre un 0,59% a un 0,60% corresponde a pérdidas por evaporación del espejo de agua de los canales, lo cual es la pérdida de menor en la zona de estudio, lo que corresponde a 0,02 Hm<sup>3</sup> de agua.

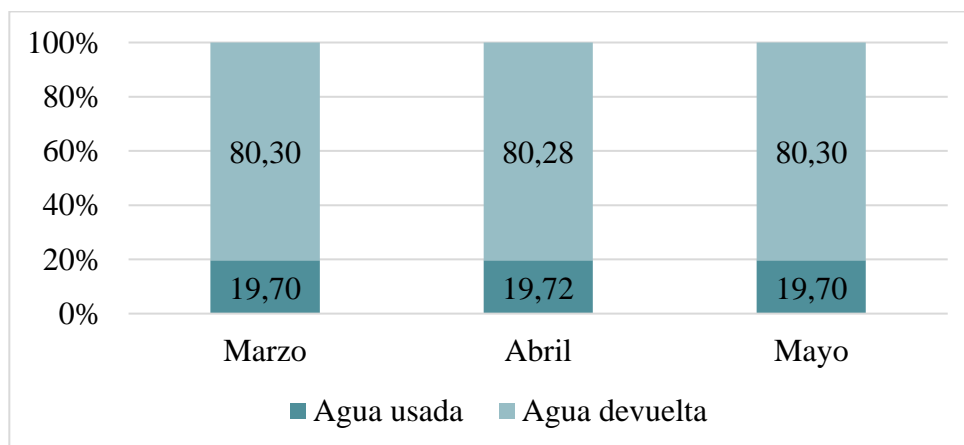
**Cuadro 17.** Volumen de agua de entrada y pérdidas en toda la “Finca Madre”, para los meses de marzo, abril y mayo.

	<b>Marzo</b>	<b>Abril</b>	<b>Mayo</b>
Entrada de agua por compuertas (Hm <sup>3</sup> )	20,74	20,74	20,74
Infiltración estanques (Hm <sup>3</sup> )	3,11	3,11	3,11
Evaporación estanques (Hm <sup>3</sup> )	0,18	0,18	0,18
Evaporación canales (Hm <sup>3</sup> )	0,02	0,02	0,02
Infiltración canales (Hm <sup>3</sup> )	0,77	0,77	0,77
Suma pérdidas (Hm <sup>3</sup> )	4,08	4,09	4,09
Agua que queda luego de las pérdidas (Hm <sup>3</sup> )	16,65	16,65	16,65
% perdido al mes	19,70	19,72	19,70



**Figura 50.** Porcentaje de cada una de las pérdidas en la “Finca Madre” con respecto al total, para los meses de marzo, abril y mayo.

Por último, partiendo del valor teórico reportado del SENARA de  $8 \text{ m}^3/\text{s}$  de agua que entran a la finca, se tiene que entre un 80,28% a un 80,30% de agua es devuelto a los canales de conducción del SENARA y entre un 19,70% a un 19,72% se consume para mantener el espejo de agua y conducción en canales, para los meses de estudio (figura 51).



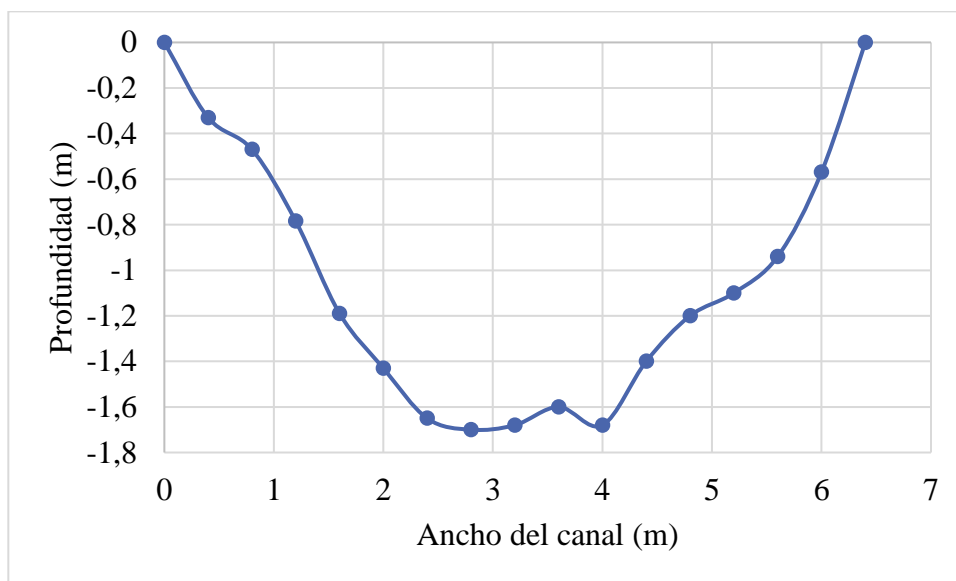
**Figura 51.** Porcentaje de agua usado y agua devuelta para los meses de estudio, partiendo del dato de  $8 \text{ m}^3/\text{s}$  reportado por el SENARA.

Al analizar otros estudios que tuvieron problemas con la estructura o textura del suelo, Teichert-Coddington et al., (1988) encontraron que las pérdidas por infiltración en los estanques corresponden a un porcentaje mayor al 70% lo cual concuerda con los resultados obtenidos en este estudio. Se debe considerar que los cultivos acuícolas consumen mayor cantidad que la agricultura convencional y que existe preocupación por el adecuado uso del agua en esta última. El uso de balances hídricos en estanques acuícolas es importante para saber los requerimientos de volumen de agua en estanques (Sharma et al., 2013).

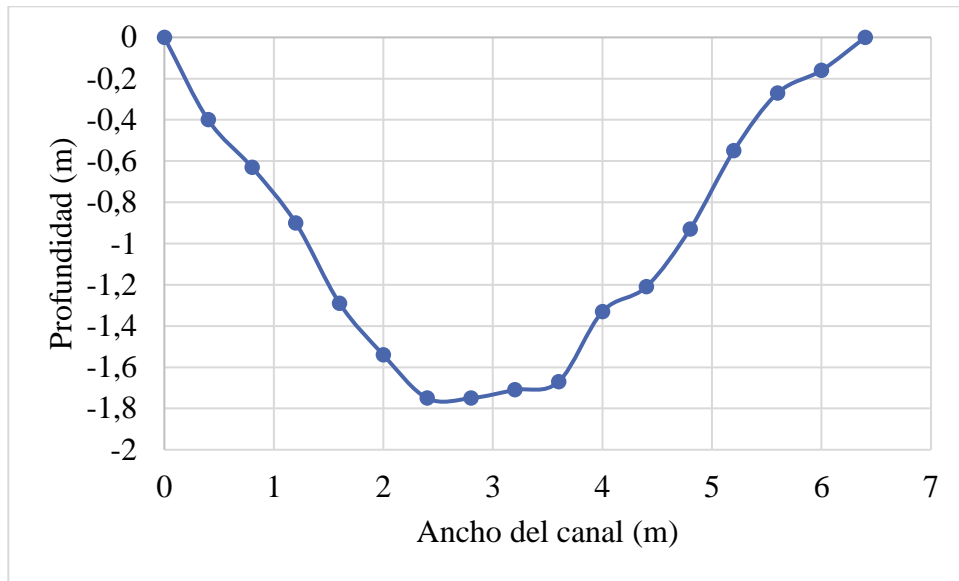
#### 5.2.4. Aforos y caudal

##### 5.2.4.1. Análisis del perfil me los canales

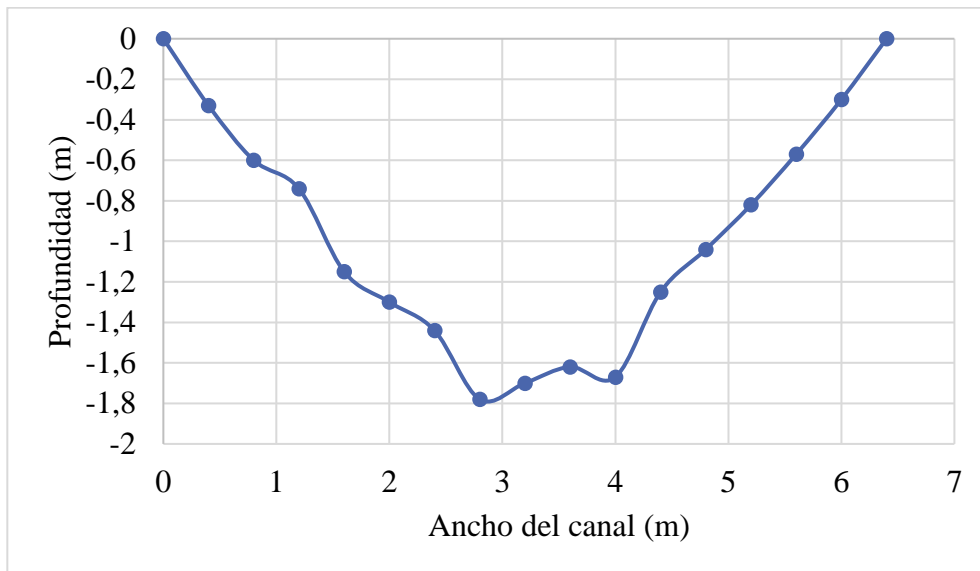
En la figura 52 a), b) y c), se observa los perfiles longitudinales cuando se realizaron los aforos a la entrada principal. Se aprecia que, el canal se mantiene constante a lo largo de los días de estudio, por lo que se puede asumir que el canal mantuvo su sección transversal constante para la realización de los cálculos. El canal tiene un ancho de aproximadamente 6,4 m, por lo que se decidió dividirlo en 16 partes de 0,4 m, según las recomendaciones del anexo teórico 1.



52.a



52.b



52.c

**Figura 52.** Perfiles longitudinales del canal de la entrada principal, para diferentes días que se realizaron aforos a) mayo b) junio y c) julio (el 0 corresponde a la superficie del agua).

#### 5.2.4.2. Cálculos del caudal en la entrada principal

En el cuadro 18, se observan los diferentes aforos realizados que varían entre 4,69 a 5,37 m<sup>3</sup>/s para el método de la sección intermedia y entre 4,65 a 5,33 m<sup>3</sup>/s para el método de la sección media. Esto para niveles de agua en el canal entre 1,64 a 1,78 m, por lo que se tuvo una variación de 0,14 m de variación de nivel del agua en los meses que se realizaron los aforos. Se aprecia que una diferencia de 14 cm significa 0,68 m<sup>3</sup>/s más de agua que pasa por la entrada principal de la “Finca Madre”.

Otro punto a considerar es que inclusive en breves períodos, el caudal puede variar significativamente, por ejemplo, del aforo 4 al 6 hubo una diferencia de 1 hora, que significó 0,04

m más de nivel de agua y 0,14 m<sup>3</sup>/s más de caudal. Por otro lado, la diferencia entre los dos métodos es menor al 2%. Esto concuerda con la literatura ya que el error entre los dos métodos según (Le Coz et al., 2012) es cercano al 1%.

**Cuadro 18.** Caudal obtenido mediante el método de la sección intermedia y media en la entrada principal de la "Finca Madre" para diferentes aforos, y su respectivo nivel del agua.

<b>Caudal (m<sup>3</sup>/s)</b>			
	<b>Método de la sección intermedia</b>	<b>Método de la sección media</b>	<b>Nivel del agua (m)</b>
M1	5,17	5,12	1,7
M2	4,69	4,65	1,64
M3	4,8	4,76	1,66
M4	5,23	5,19	1,74
M5	5,32	5,27	1,75
M6	5,37	5,33	1,78
M7	5,07	5,04	1,68

Nota: M1 = medición 1 y así sucesivamente.

Con respecto al método de la sección intermedia se utilizó la ecuación 8. En el caso de la medición 2 (M2) de caudal, en el límite izquierdo (LI) se tiene una distancia de 0, y una profundidad de 0 m. Si se avanza a la siguiente sección (P1) se tiene una distancia de 0,4 m desde el punto inicial, una profundidad de 0,29 m, una velocidad a los 0,2 de profundidad de 0,07 m/s y una profundidad a los 0,8 de profundidad de 0,05 m/s, todos los valores fueron medidos en campo, con estos datos se obtiene el caudal para la primera sección de 0,0070 m<sup>3</sup>/s (ecuación 52). Se realiza el mismo procedimiento hasta el punto final hasta sumar todos los caudales y obtener un resultado 4,52 m<sup>3</sup>/s.

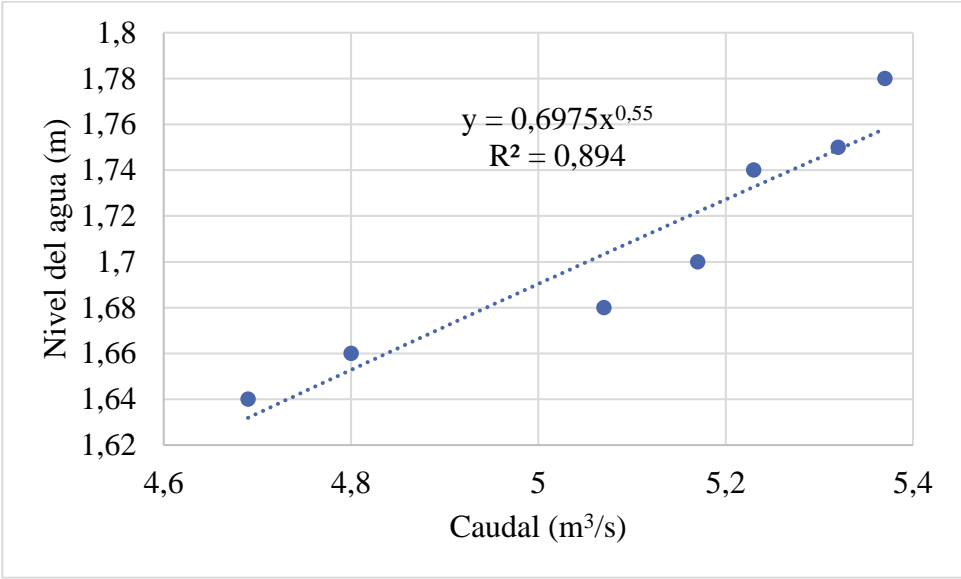
En el caso del método de la sección media se utilizan las ecuaciones 6 y 7, en la sección inicial (P1) se obtiene un valor de 0,0023 m<sup>3</sup>/s (ecuación 53), se utilizó los mismos valores para P1 que en el método de la sección intermedia. Por otro lado, se utiliza la ecuación 7, para la sección inicial y final. En el caso de la sección P2, se tiene una distancia de 0,8 m desde el punto inicial, una profundidad de 0,52 m, una velocidad a los 0,2 de profundidad de 0,011 m/s y una profundidad a los 0,8 de profundidad de 0,07 m/s, para un promedio de 0,09 m/s, todos los valores fueron medidos en campo. Con esto se obtiene un valor 0,012 m<sup>3</sup>/s (ecuación 54), se prosigue a realizar el mismo procedimiento para cada sección y se suman todos los caudales para obtener un valor 4,49 m<sup>3</sup>/s. En los anexos del 30 al 36 se muestra la datos para obtener las mediciones de caudal por los dos métodos.

$$q_{P1-intermedia} = \left( \frac{0,07+0,05}{2} \right) \left( \frac{m}{s} \right) * \frac{1}{2} (0,40 \text{ m} - 0 \text{ m}) * 0,29 \text{ m} = 0,0070 \frac{m^3}{s} \quad (52)$$

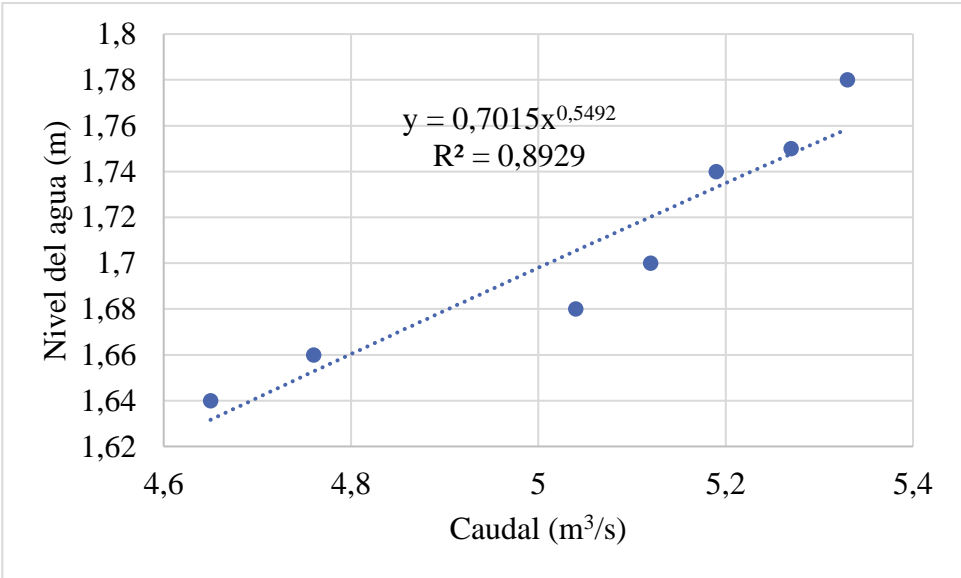
$$q_{P1-media} = \frac{2}{3} \left( 0,06 \frac{m}{s} \right) * \frac{1}{2} (0,29 \text{ m}) * 0,40 \text{ m} = 0,0023 \frac{m^3}{s} \quad (53)$$

$$q_{P2-media} = \left[ \frac{(0,06 + 0,09) \frac{m}{s}}{2} \right] * \left[ \frac{(0,29 + 0,59) \text{ m}}{2} \right] * (0,8 - 0,4) \text{ m} = 0,012 \frac{m^3}{s} \quad (54)$$

En la figura 53 a) y b) se observa la línea de mejor ajuste para las ecuaciones de curva de descarga para los dos métodos de obtención de caudal (método de sección intermedia y método de sección media). Se obtiene una ecuación igual a  $0,6975x^{0,550}$  con un  $R^2$  de 0,894, para el caso de la sección intermedia, mientras que se tiene una ecuación de  $0,7015x^{0,5492}$  con un  $R^2$  de 0,893, para el método de la sección media. Al ser los dos modelos con un  $R^2$ , mayor a 0,7 se dice que los datos tienen un ajuste aceptable a la ecuación propuesta en la literatura para relacionar nivel de agua con caudal. Se decide utilizar la ecuación con mejor ajuste para su implementación en el sensor que se pondrá en el canal principal de la "Finca Madre".



53.a



53.b

**Figura 53.** Curvas de descarga con su respectiva ecuación para el método de la sección a) media y b) intermedia.

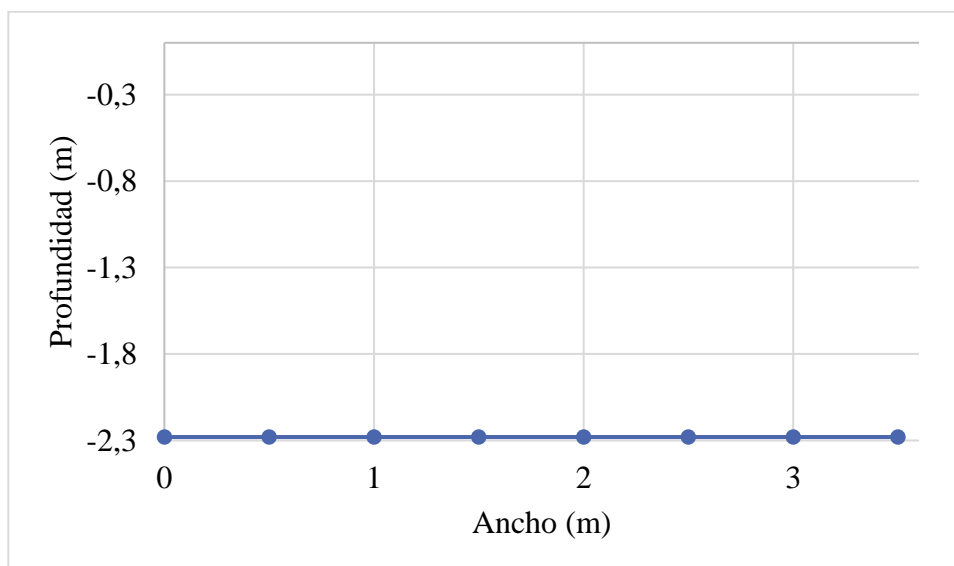


### 5.2.4.3. Aforos y cálculo del caudal en las entradas y salidas de la “Finca Madre”

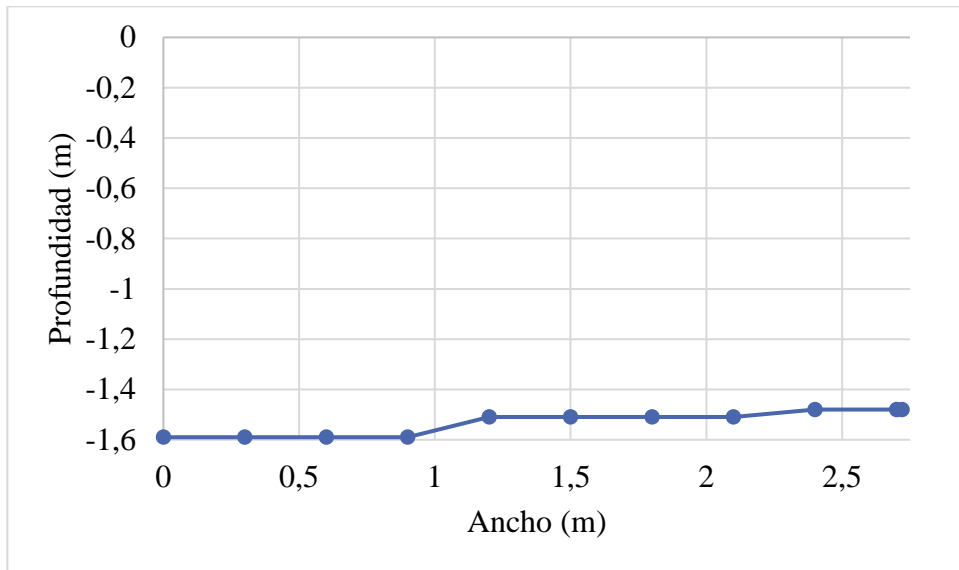
En el cuadro 19 se muestran los caudales medidos mediante aforos en la entrada principal y en la entrada de la III etapa (figura 26 a y b). Además, se muestra las tres salidas al desviar el agua en las salidas correspondientes al punto 4 y 5 (figura 26 c,d y e) que se dirigen al río Cañas, la suma total de las entradas es de 7,01 m<sup>3</sup>/s. Según los datos suministrados por el SENARA, entran a la finca 8 m<sup>3</sup>/s. Pese a que se tiene una diferencia de 0,99 m<sup>3</sup>/s, las observaciones realizadas del caudal entrante varían significativamente, inclusive en breves períodos. Además, solo se realizó un aforo en la compuerta en la III Etapa, por lo que podría esperarse que en algún momento determinado logre entrar los 8 m<sup>3</sup>/s. Para el cálculo de los caudales de la entrada de la compuerta de la III Etapa y las salidas en la Finca Madre, se utilizó el método de la sección intermedia y se siguió el mismo procedimiento que se explicó en párrafos anteriores, las memorias de cálculo se muestran en los anexos 37, 38, 39 y 40. En la figura 54 a, b, c y d, se muestran los perfiles longitudinales de las entradas y salidas anteriormente descritas.

**Cuadro 19.** Balance hídrico considerando las entradas y las salidas dentro de la zona de estudio.

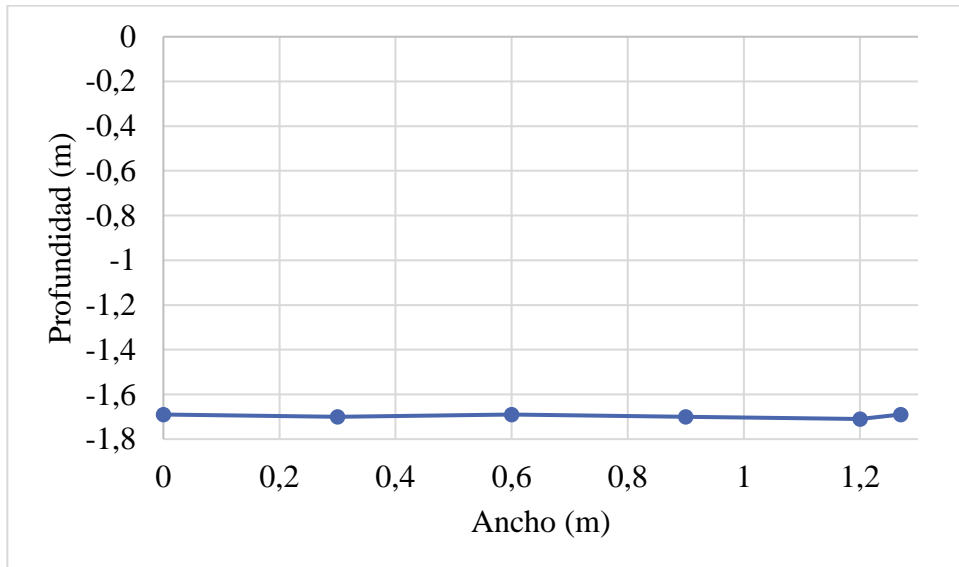
Entrada/Salida	Caudal (m <sup>3</sup> /s)
Entrada principal	5,33
Entrada III Etapa	1,68
Salida Entrada Finca Santa Paula	0,28
Salida hacia Río Cañas directa	0,82
Salida hacia Río Cañas Compuerta CD9-2	2,14
Balance hídrico (entradas - salidas)	3,77



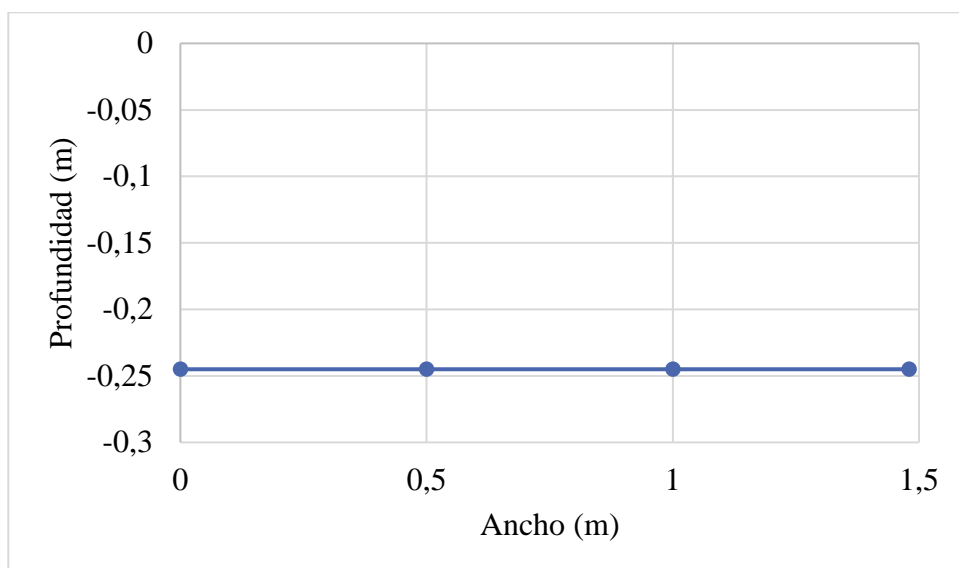
**54.a**



54.b



54.c



**54.d**

**Figura 54.** Perfiles longitudinales del canal de la entrada principal, para diferentes días que se realizaron aforos a) entrada compuerta III Etapa, b) salida compuerta hacia río Cañas directa, c) salida compuerta hacia río Cañas CD9-2 y d) salida compuerta Santa Paula.

En el cuadro 20, se muestra el balance hídrico (entradas menos pérdidas) al considerar las pérdidas dentro la finca que se calcularon en la sección 5.5, en la ecuación 55 se pasan las pérdidas totales dentro de la finca en  $\text{Hm}^3/\text{mes}$  a  $\text{m}^3/\text{s}$ . Si se compara con el balance hídrico obtenido de los datos de campo (entradas menos salidas) del cuadro 20, existe una diferencia de  $1,50 \text{ m}^3/\text{s}$ . Pese a que el día que se realizó las mediciones de velocidad de agua se desvió para que todos los caudales salieron solo por las salidas citadas anteriormente, puede haber en finca puntos donde existan pérdidas de agua que no consideraron. Otra punto a considerar, es que existe una zona en la compuerta CD9-2 (figura 55), que no se pudo medir la velocidad del agua, ya que era peligroso colocar el equipo por lo que igualmente puede afectar el resultado. Además, el caudal nunca es constante en el tiempo. Existieron diferencias de hasta una hora entre las mediciones de diferentes caudales de las salidas y las entradas, esto por la lejanía de varios kilómetros entre puntos de medición.

**Cuadro 20.** Balance hídrico considerando las entradas y las pérdidas dentro de la finca.

<b>Entrada/Salida</b>	<b>Caudal (<math>\text{m}^3/\text{s}</math>)</b>
Entrada principal	5,17
Entrada III Etapa	1,68
Pérdidas dentro de la finca	1,58
Balance hídrico	5,27

$$\frac{4,09 \text{ Hm}^3}{1 \text{ mes}} * \frac{1 \text{ mes}}{30 \text{ días}} * \frac{1 \text{ día}}{24 \text{ h}} * \frac{1 \text{ h}}{60 \text{ min}} * \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} * \left( \frac{100 \text{ m}^3}{1 \text{ Hm}^3} \right)^3 = 1,58 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \quad (55)$$



**Figura 55.** Zona de la compuerta CD9-2 la cual no se pudo medir la velocidad del agua.

## 6. CONCLUSIONES

-A escala de laboratorio el sensor “SUTA” tuvo una diferencia con respecto a las mediciones que se realizaron con la aguja de precisión de entre 0,2 cm a 0,6 cm, por lo que está por debajo de la recomendación de 2 a 5 cm como error máximo en dispositivos usados en hidrometría. Por otro lado, se encontró que la diferencia aumenta entre mayor sea la distancia entre el sensor y el tirante de agua y cuanto más turbulento sea el flujo.

-Solo una medición en el gráfico precontrol de los datos medidos por el sensor “SUTA” en campo, se encontró fuera de control. Todas las demás mediciones estuvieron por debajo de los límites inferior mínimo (0,50 m) y límite superior máximo (0,60 m), valores atípicos se pueden deber por el ruido ocasionado por las vibraciones del puente, por lo cual se encuentra entre la precisión aceptable para mediciones en hidrometría (<5 cm de la medición real).

-Los datos medidos por el sensor “SUTA” en campo tuvieron un valor promedio de 0,543 m  $\pm$ 0,0139 m, lo que representa un error del 1,27% con la medición real de 0,55 m. Por otro lado, el error de la mayoría de las mediciones fue menos a 1,00 cm con respecto a la medición real.

-El prototipo del sensor “SUTA” tiene un costo menor a 21 3000 colones consideraron el chasis y el equipo electrónico para su construcción, no se considera accesorios o equipo de protección a la intemperie.

-Se tiene un valor de evapotranspiración ( $ET_o$ ) de 153,01 $\pm$ 3,47, 155,52 $\pm$ 4,22 y de 153,72 $\pm$ 5,84 mm/mes para marzo, abril y mayo respectivamente, esto para el período de toma de datos entre 2021 y 2023, según los datos de la estación meteorológica dentro de la empresa.

-Se tiene un valor de evaporación en los estanques ( $E_e$ ) promedio de 123,94  $\pm$ 2,81, 125,97  $\pm$ 3,42 y 124,51  $\pm$ 4,7 mm/mes para marzo, abril y mayo respectivamente, esto para el período de toma de datos entre 2021 y 2023, según los datos de la estación meteorológica dentro de la empresa.

-Las pérdidas por evaporación en los estanques ( $V_{ee}$ ) corresponden a 0,18 Hm<sup>3</sup>, 0,18 Hm<sup>3</sup> y 0,18 Hm<sup>3</sup> para marzo, abril y mayo respectivamente.

-Los coeficientes de permeabilidad de los estanques varían entre 14,19 a 178,49 mm/día, por lo que mayoría de ellos tienen una infiltración extrema (>15 mm/día), solo un estanque acuícola tuvo una infiltración alta (<15 mm/día).

-Se tiene un valor de coeficiente de permeabilidad promedio de 68,86 $\pm$ 42,95 mm/día y según la literatura valores cercanos a 80 mm/día corresponden a suelos francos arcillosos, lo cual se respalda con los análisis cercanos a las zonas de estudio en cuanto a la textura del suelo.

-Se encontró que en los estanques acuícolas si existen diferencias significativas en el coeficiente de permeabilidad ( $p < 0,05$ ), por lo que se dividieron los estanques de acuerdo al tipo de producción que se maneja (intensiva o semi-intensiva) y el uso del agua, esto para el cálculo de la infiltración en los estanques.

-Las pérdidas debido a la infiltración de los estanques acuícolas ( $V_{ei}$ ) para la división 1 fue de 0,096 Hm<sup>3</sup>/mes, la división 2 fue de 1,122 Hm<sup>3</sup>/mes y la división 3 fue de 1,890 Hm<sup>3</sup>/mes, lo cual suma un total de 3,11 Hm<sup>3</sup>/mes.

-Se tiene una red de canales de 20,72 km de longitud total, estos producen pérdidas por infiltración ( $V_{ic}$ ) de  $0,77 \text{ Hm}^3$  al mes y pérdidas por evaporación ( $V_{ec}$ ) de  $0,024 \text{ Hm}^3$ ,  $0,025 \text{ Hm}^3$  y  $0,024 \text{ Hm}^3$  para los meses de marzo, abril y mayo respectivamente, para un total de  $0,80 \text{ Hm}^3/\text{mes}$ .

-En el caso del total de pérdidas en la "Finca Madre" que suman entre  $4,08$  a  $4,09 \text{ Hm}^3$  de agua, un  $76,09\%$  corresponden a las pérdidas por infiltración de los estanques ( $V_{ie}$ ), entre un  $4,38\%$  y un  $4,45\%$  corresponde a pérdidas por evaporación en los estanques ( $V_{ee}$ ), un  $18,93\%$  corresponde a pérdidas por infiltración en canales ( $V_{izc}$ ) y entre un  $0,59$  a un  $0,60\%$  corresponde a pérdidas por evaporación en los canales ( $V_{ec}$ ).

-Si se parte del dato teórico de  $8 \text{ m}^3/\text{s}$  reportado por el SENARA, se tiene que entre un  $80,28\%$  a un  $80,30\%$  del caudal es devuelto, mientras se gasta para la producción de tilapia entre un  $19,70\%$  a un  $19,72\%$  del caudal, para los meses de estudio.

-A lo largo del estudio, el perfil longitudinal se mantuvo estable, por lo que se parte del supuesto que este no cambia a lo largo del tiempo.

-A lo largo del estudio se tuvieron caudales entre  $4,69$  a  $5,37 \text{ m}^3/\text{s}$  para el método de la sección intermedia y de  $4,65$  a  $5,33 \text{ m}^3/\text{s}$  para el método de la sección media para la entrada principal de la zona de estudio, para niveles de agua entre  $1,64$  y  $1,78 \text{ m}$ .

-La variación de  $0,11 \text{ m}$  en el nivel del agua, en la entrada principal durante el periodo de estudio significó un aumento de caudal de  $0,68 \text{ m}^3/\text{s}$  más de agua.

-Se encontró una curva de descarga igual a  $0,6975x^{0,550}$  para el método de la sección intermedia con un  $R^2$  de  $0,894$  y de  $0,7015x^{0,5492}$  para el método de la sección media con un  $R^2$  de  $0,8929$ .

-Se obtuvo un caudal de entrada de  $7,01 \text{ m}^3/\text{s}$  al sumar el caudal de la entrada principal y la entrada de la III Etapa, esto es  $0,99 \text{ m}^3/\text{s}$  menos, del valor teórico reportado por el SENARA que corresponde a  $8,00 \text{ m}^3/\text{s}$ .

-Se encontró una diferencia entre el  $-11,34\%$  y  $12,06 \%$  del área del espejo de agua reportada por la empresa y las áreas medidas en campo, por lo que se debe considerar la antigüedad de los datos.

## 7.RECOMENDACIONES

-Si se desea colocar el sensor en campo este debe ser colocado a una distancia no mayor a 0,60 m, entre el sensor y el nivel del agua. Por otro lado, se debe colocar en zonas donde el flujo del agua sea lo más suave posible y se debe procurar que no existan obstáculos en los costados de este. Además, se debe colocar de tal manera que no existan ángulos de inclinación con respecto a la plataforma que se encuentre.

-Se debe considerar el alcance de la señal Wi-Fi a la que esté conectado el microprocesador para el envío de datos a Thingier.io. Por lo que, se puede considerar optar por un ESP32 con tarjeta SIM incluida que funciona con Internet y datos propios, sin embargo, estos son más caros en el mercado (por ejemplo, el TTGO ESP32-WROMER con SIM7000G).

-EL sensor debe ser colocado en la parte central del canal (ya que aquí es donde se encuentra el nivel de agua más profundo), por otro lado, se recomienda realizar por lo menos una medición de la distancia entre el sensor y el fondo del canal al mes, para actualizar en el código de programación este valor y que no existan sesgos en los valores reportados de caudal.

-Debido a que el sensor se encuentra en la intemperie en campo y las temperaturas altas de la zona de estudio, se debe colocar el sensor en un chasis con un aislamiento para evitar el sobrecalentamiento de los componentes electrónicos . Igualmente, se puede considerar el uso de un panel solar para la alimentación del sensor, en vez de una batería recargable para tener un sensor totalmente autónomo en cuanto a alimentación.

-Debido a que se encontró una diferencia entre -11,34% y 12,06%, entre los valores reportados por la empresa y los medidos en campo del área de los estanques, se debe considerar volver a medir el área y el perímetro de los estanques, por medidas topográficas en campo o a través de imágenes satelitales, para estudios futuros que necesiten este dato u obtener datos más exactos para el cálculo del balance hídrico.

-De acuerdo con las visitas realizadas a la “Finca Madre” el proyecto de cercas vivas, aunque no son tan significativas como otras pérdidas puede reducir la evaporación en los canales. Además, a nivel de planeamiento de la producción dentro de la finca, se debe de tratar de no dejar por períodos prolongados los estanques acuícolas secos para evitar problemas de infiltración y agrietamiento de los suelos.

## 8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adafruit. (s.f.). *US-100 Ultrasonic Distance Sensor - 3V or 5V Logic*. Recuperado 2 de agosto de 2024 de <https://www.adafruit.com/product/4019>
- Adhikari, S., Pani, K. C., Mandal, R. N., Chakrabarti, P. P., Giri, B. S., & Jayasankar, P. (2016). Water budgets for freshwater fish ponds of Andhra Pradesh, Orissa and West Bengal, India. *Water Supply*, 17(3), 835–841. <https://doi.org/10.2166/ws.2016.177>
- Allen, R., Pereira, L., Raes, D., & Smith, M. (2006). *Evapotranspiración del Cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos* (1ra ed.). Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.
- Alvarado, C., & Barahona, M. (2017). Comparación de Tres Métodos de infiltración utilizados para el Cálculo del Balance Hídrico del Suelo, en la cuenca del río suquiapa, El Salvador. *UNED Research Journal*, 9(1), 23–33. <https://doi.org/10.22458/urj.v9i1.1674>
- Arduino. (2021). *What is Arduino?*. Arduino. Recuperado el 23 de noviembre 2021 de <https://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction>.
- Banco Mundial. (2022). *Water in agriculture*. World Bank. Recuperado 17 de enero de <https://www.worldbank.org/en/topic/water-in-agriculture>
- Bertoleti, P. (2019). *Proyectos con ESP32 y LORA*. Instituto Newton C Braga. Recuperado de [https://www.google.co.cr/books/edition/Proyectos\\_com\\_ESP32\\_y\\_LoRa/Doi0DwAAQBAJ?hl=es&gbpv=1&dq=esp32&printsec=frontcover](https://www.google.co.cr/books/edition/Proyectos_com_ESP32_y_LoRa/Doi0DwAAQBAJ?hl=es&gbpv=1&dq=esp32&printsec=frontcover).
- Boyten, W. (2003). *Hydrometry* (1st ed.). A.A. Balkema Publishers.
- Boyd, C. (1985). Pond Evaporation. *Transactions Of The American Fisheries Society*, 114(2), 299 303. [https://doi.org/10.1577/1548-8659\(1985\)114<299:pe>2.0.co;2](https://doi.org/10.1577/1548-8659(1985)114<299:pe>2.0.co;2)
- Boyd, C. (2019). *Assessing, reducing pond seepage - responsible seafood advocate*. Assessing, reducing pond seepage. Recuperado de <https://www.globalseafood.org/advocate/assessing-reducing-pond-seepage/?headlessPrint=AAAAPIA9c8r7gs82oWZBA>
- Boyd, C. E. (1982). Hydrology of small experimental fish ponds at Auburn, Alabama. *Transactions of the American Fisheries Society*, 111(5), 638–644. [https://doi.org/10.1577/1548-8659\(1982\)111<638:hosefp>2.0.co;2](https://doi.org/10.1577/1548-8659(1982)111<638:hosefp>2.0.co;2)



- Boyd, C. E. (2020). *Water use in aquaculture - responsible seafood advocate*. Global Seafood Alliance. Recuperado de <https://www.globalseafood.org/advocate/water-use-in-aquaculture/?headlessPrint=AAAAPIA9c8r7gs82oWZBA>
- Boyd, C., & Gross, A. (2000). Water use and conservation for inland aquaculture ponds. *Fisheries Management And Ecology*, 7(1-2), 55-63. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2400.2000.00181.x>
- Braaten, O., & Flaherty, M. (2000). Hydrology of inland brackishwater shrimp ponds in Chachoengsao, Thailand. *Aquacultural Engineering*, 23(4), 295–313. [https://doi.org/10.1016/s0144-8609\(00\)00059-5](https://doi.org/10.1016/s0144-8609(00)00059-5)
- Buhion, J., Buhion, J., & Ocon, J. (2022). The development of a real time, interactive water level monitoring system through SMS with AC Load Control. *Technium: Romanian Journal of Applied Sciences and Technology*, 4(5), 67–76. <https://doi.org/10.47577/technium.v4i5.6698>
- Chislock, M. (2013). *Eutrophication: Causes, Consequences, and Controls in Aquatic Ecosystems Learn Science at Scitable*. Nature.com. Recuperado el 13 de junio de 2022 de <https://www.nature.com/scitable/knowledge/library/eutrophication-causes-consequences-and-controls-in-aquatic-102364466/>.
- Corapi, P., Acaro Chacon, X. C., Gaibor Nieto, J. A., & Villavicencio Bajaña, W. F. (2021). Sistema de Monitoreo de caudal y tirante para el laboratorio piloto de hidráulica de la facultad de ciencias matemáticas y físicas. *Investigación, Tecnología e Innovación*, 13(14), 1–17. <https://doi.org/10.53591/iti.v13i14.1197>
- D'Ausilio, A. (2012). Arduino: A low-cost multipurpose lab equipment. *Behav Res*, 44, 306-309. <https://doi.org/10.3758/s13428-011-0163-z>
- Dusarlapudi , K., Chandrika, V., Rao , C., & Narayana, M. (2020). Accuracy Analysis Of An Ultrasonic Sensor Over An Open Channel Rectangular Notch For Rainwater Harvesting. *International Journal of Scientific & Technology Research*, 9(1), 2813–2816.
- Espressif Systems. (2024). ESP32 Series Datasheet. Recuperado el 2 de agosto de 2024 de [https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32\\_datasheet\\_en.pdf](https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf)

- FAO. (2006). *Fao Training Series: Simple methods for aquaculture* (2da edición.). FAO; Fisheries and Aquaculture Management Division. Recuperado 8 de abril de 2023 de [https://www.fao.org/fishery/docs/CDrom/FAO\\_Training/FAO\\_Training/ENG\\_MENU.htm](https://www.fao.org/fishery/docs/CDrom/FAO_Training/FAO_Training/ENG_MENU.htm).
- FAO. (2020). *El estado mundial de la pesca y la acuicultura 2020. La sostenibilidad en acción*. [Ebook] (1ra ed., pp. 134-135). FAO. Recuperado el 22 noviembre de 2021 de <https://www.fao.org/documents/card/en/c/ca9229es>.
- FAO. (2021). *EL ESTADO DE LOS RECURSOS DE TIERRAS Y AGUAS DEL MUNDO PARA*
- Fathur Rahman, N. M., Manjang, S., & Zainuddin, Z. (2017). Water level monitoring using ultrasonic-pipe in open channel. *2017 15th International Conference on Quality in Research (QiR) : International Symposium on Electrical and Computer Engineering*. <https://doi.org/10.1109/qir.2017.8168493>
- Finney, B. (s.f.) Stage Measurement. Recuperado el 26 de mayo de 2023 de <https://kacv.net/brad/nws/lesson1.html>
- Fondo Internacional de Desarrollo Agrícola. (2022). *Pesca y acuicultura*. IFAD. Recuperado el 5 junio de 2022 de <https://www.ifad.org/es/fisheries>.
- Galli, A., Peruzzi, C., Gangi, F., & Masseroni, D. (2022). Arduhydro: A low-cost device for water level measurement and monitoring. *Research Square*, 1–25. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2252311/v1>
- Gobatti, L., Martins, J. R., Pereira, M. C., & Leite, B. C. (2022). Real-time sensing and low-cost experimental setup for water quantity investigation in nature-based solutions. *Blue-Green Systems*, 4(2), 75–88. <https://doi.org/10.2166/bgs.2022.007>
- Green, B. W., & Boyd, C. E. (1995). Water budgets for fish ponds in the Dry Tropics. *Aquacultural Engineering*, 14(4), 347–356. [https://doi.org/10.1016/0144-8609\(95\)00002-v](https://doi.org/10.1016/0144-8609(95)00002-v)
- Hernández, K. (2014). Cálculo de la evaporación en Costa Rica mediante el método FAO-56. *Tópicos Meteorológicos Y Oceanográficos*, 43-49.
- Hernández, K. & Montero, R. (2023). ¿Ha sido este abril (2023) más cálido de lo normal?. *Boletín Agroclimático Caña de Azúcar*, 5(9). 5-10. <https://servicios.laica.co.cr/laica-cv-biblioteca/index.php/Library/download/YCmnXtuwviKPTOzdnAWeVENzyIbfCrCJ>

- Hudson, N. W. (1993). *Field measurement of soil erosion and runoff*. FAO. Recuperado 26 de mayo de <https://www.fao.org/3/t0848E/t0848e00.htm#TopOfPage>.
- Instituto Meteorológico de Costa Rica [IMN]. (2013). *Series de brillo solar en Costa Rica*. Ministerio de Ambiente y Energía. Recuperado el 6 de agosto de 2023, de <https://www.imn.ac.cr/documents/10179/20909/Series+de+Brillo+Solar+en+Costa+Rica>.
- Kato, A., & Sinde, R. (2015). Design of an Automated River Water Level Monitoring System by using Global System for Mobile Communications. *International Journal of Computer Science and System Analysis*, 13(10).
- Keyence. (2022). *What is an Ultrasonic Sensor? | Sensor Basics: Introductory Guide to Sensors /KEYENCE*. Keyence.com. Recuperado el 21 julio de 2022 de <https://www.keyence.com/ss/products/sensor/sensorbasics/ultrasonic/info/>
- Kipkemboi, J., van Dam, A. A., Mathooko, J. M., & Denny, P. (2007). Hydrology and the functioning of seasonal wetland aquaculture–Agriculture Systems (fingerponds) at the shores of Lake Victoria, Kenya. *Aquacultural Engineering*, 37(3), 202–214. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2007.06.004>
- Koshoeva, B. B., Mikheeva, N. I., Mikheev, D. I., & Bakalova, A. T. (2021). Arduino-based automated system for determining water flow consumption in open flow. *Journal of Physics: Conference Series*, 2142(1), 012009. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2142/1/012009>
- Le Coz, J., Camenen, B., Peyrard, X., & Dramais, G. (2012). Uncertainty in open-channel discharges measured with the velocity–area method. *Flow Measurement and Instrumentation*, 26, 18–29. <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2012.05.001>
- Leitón, J. (1985). *Riego y drenaje* (1st ed.). Editorial Universidad Estatal a Distancia de Costa Rica. Recuperado el 16 de marzo de 2023 de [https://www.google.co.cr/books/edition/Riego\\_Y\\_Drenaje/\\_yuPFwKJ6ywc?hl=es&gbpv=1](https://www.google.co.cr/books/edition/Riego_Y_Drenaje/_yuPFwKJ6ywc?hl=es&gbpv=1).
- Li, M., Wang, X., Qi, C., Li, E., Du, Z., Qin, J., & Chen, L. (2018). Metabolic response of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) to acute and chronic hypoxia stress. *Aquaculture*, 495, 187- 195. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2018.05.031>

- Macías, J., Vargas, A., & Arellano, F. (2018). Hydraulic Conductivity in two sites of the Central Valley of Costa Rica: comparative análisis of three methodologies of testing in the vadose zone. *Revista Geológica De América Central*, 59, 75–100. <https://doi.org/10.15517/rgac.v59i0.34160>
- Marina, L., KARLYKHANOV, O., PONKRATYEV, D., IMANALIYEV, T., & TAZHIYEVA, T. (2018). Automatic water meter for gauging stations of irrigation canals. *Revista Espacios*, 39(34), 29.
- Martín, J. (2018). *Equipos eléctricos y electrónicos* (1ra ed., p. 213). Editex.
- Martínez, J. F., & Domínguez, E. A. (2012). Uncertainty regarding instantaneous discharge obtained from stage-discharge rating curves built with low density discharge measurements. *Ingeniería E Investigación*, 32(1), 30-35. doi:10.15446/ing.investig.v32n1.28517
- Mellinger, A., & Joysey, W. (2019). *Low-cost ultrasonic distance measurement in a mechanical resonance experiment*. Department of Physics, Central Michigan University. Recuperado 11 de mayo de 2023 de [https://www.researchgate.net/publication/333971560\\_Low-cost\\_ultrasonic\\_distance\\_measurement\\_in\\_a\\_mechanical\\_resonance\\_experiment](https://www.researchgate.net/publication/333971560_Low-cost_ultrasonic_distance_measurement_in_a_mechanical_resonance_experiment). .
- Ministerio de Agricultura y Ganadería. (2024). *Caracterización del área de influencia de la agencia de extensión agropecuaria de Cañas*. Recuperado de <https://www.mag.go.cr/regiones/chorotega/CARACTERIZACION-AEA-CANAS.pdf>
- Mohammed, S. L., Al-Naji, A., Farjo, M. M., & Chahl, J. (2019). Highly accurate water level measurement system using a microcontroller and an ultrasonic sensor. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 518(4), 042025. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/518/4/042025>
- Nasution, T. H., Siagian, E. C., Tanjung, K., & Soeharwinto. (2018). Design of river height and speed monitoring system by using Arduino. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 308, 012031. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/308/1/012031>
- Nath, S. S., & Bolte, J. P. (1998). A water budget model for Pond Aquaculture. *Aquacultural Engineering*, 18(3), 175–188. [https://doi.org/10.1016/s0144-8609\(98\)00029-6](https://doi.org/10.1016/s0144-8609(98)00029-6)
- ONU. (2021). *Población | Naciones Unidas*. United Nations. Recuperado el 22 noviembre de 2021 de

<https://www.un.org/es/global-issues/population>.

Peña, C. (2020). *Arduino IDE: configuración y uso*. USERS. Recuperado el 11 de mayo de 2023 de [https://www.google.co.cr/books/edition/Arduino\\_IDE/Xgv2DwAAQBAJ?hl=es&gbpv=1&dq=arduino+ide&printsec=frontcover](https://www.google.co.cr/books/edition/Arduino_IDE/Xgv2DwAAQBAJ?hl=es&gbpv=1&dq=arduino+ide&printsec=frontcover).

Ritzema, H. (1994). *Drainage principles and applications* (2nd ed.). ILRI, International Institute for Land Reclamation and Improvement. Recuperado el 16 de marzo de 2023 de [https://www.researchgate.net/publication/272564027\\_Drainage\\_Principles\\_and\\_Applications\\_Ritzema\\_HP](https://www.researchgate.net/publication/272564027_Drainage_Principles_and_Applications_Ritzema_HP).

Rodrigues, T., Pires, T., Augusto, T., & Martins, K. (2022). Evaluation of water level in flowing channels using ultrasonic sensors. *Sustainability*, 14(9), 5512. <https://doi.org/10.3390/su14095512>

Servicio Nacional de Aguas Subterráneas, Riego y Avenamiento. (2020). *Distrito de Riego Arenal Tempisque*. Senara.or.cr. Recuperado el 13 de junio de 2023 de <https://www.senara.or.cr/proyectos/drat/index.aspx>.

Servicio Meteorológico Nacional de los Estados Unidos. (s.f.). Stage-discharge relationships. Recuperado el 20 de febrero de 2023 de <https://kacv.net/brad/nws/lesson1.html>

Shaikh, I., & Lee, T. (2016). Estimating Earthen Tertiary Water Channel Seepage Losses as a Function of Soil Texture. *Journal Of Hydrologic Engineering*, 21(2), 06015012. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)he.1943-5584.0001292](https://doi.org/10.1061/(asce)he.1943-5584.0001292)

Shanghai Ruyun Electronics. (2023.). CN3791. <http://www.consonance-elec.com/en/72.html>

Sharma, K. K., Mohapatra, B. C., Das, P. C., Sarkar, B., & Chand, S. (2013). Water budgets for freshwater aquaculture ponds with reference to effluent volume. *Agricultural Sciences*, 04(08), 353–359. <https://doi.org/10.4236/as.2013.48051>

Somerville, C., Cohen, M., Pantanella, E., Stankus, A., & Lovatelli, A. (2014). *Small-scale aquaponic food production Integrated fish and plant farmin* [Ebook] (1ra ed., pp. 1-9, 108- 121). Food and Agriculture Organization of the United Nations. Recuperado el 22 de noviembre de 2021 de <https://www.fao.org/3/i4021e/i4021e.pdf>.

Stone, N., & Boyd, C. (1989). *Seepage from Fishponds* (1ra ed.). University of Alabama.

- Subekti, A., Cahyono, B. E., Misto, & Nugroho, A. T. (2022). Static characteristics analysis of ultrasonic sensor HC-SR 04 and its application to water level monitoring based on Arduino Uno. *The 3rd International Conference on Physical Instrumentation and Advanced Materials (IPCIAM)*. <https://doi.org/10.1063/5.0108043>
- Teichert-Coddington, D. R., Stone, N., & Phelps, R. P. (1988). Hydrology of fish culture ponds in Gualaca, Panama. *Aquacultural Engineering*, 7(5), 309–320. [https://doi.org/10.1016/0144-8609\(88\)90013-1](https://doi.org/10.1016/0144-8609(88)90013-1)
- Tidwell, J. (2012). *Aquaculture production systems* (1ra ed., pp. 56-75). Wiley-Blackwell.
- Torrente, O. (2013). *Arduino: Curso práctico de formación* (1ra ed.). RC Libros, Madrid, España.
- Trendov, N., Varas, S., & Zeng, N. (2009). *Tecnologías digitales en la agricultura y las zonas rurales. Documento de Orientación*. (1ra ed., pp. 3-4). FAO.
- Turnipseed, P., & Sauer, V. (2010). *Discharge Measurements at Gaging Stations*. Virginia: United States Geological Survey. Recuperado 15 de febrero de 2023 de <https://pubs.usgs.gov/tm/tm3-a8/tm3a8.pdf>
- United States Department of the Interior Bureau of Reclamation. (2001). *Water Measurement Manual a Water Resources Technical Publication* (3rd ed.). Washington, DC: United States Department of Agriculture. Recuperado 15 de febrero de 2023 de [https://www.usbr.gov/tsc/techreferences/mands/wmm/WMM\\_3rd\\_2001.pdf](https://www.usbr.gov/tsc/techreferences/mands/wmm/WMM_3rd_2001.pdf)
- Uribe, H. (2019). *Métodos de medición de agua en canales de riego*. Villa Alegre, Chile: Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Recuperado 15 de febrero de 2023 de <https://biblioteca.inia.cl/bitstream/handle/20.500.14001/6903/Bolet%c3%adn%20INIA%20N%c2%b0%20412?sequence=1&isAllowed=y>
- USGS. (2018). *How streamflow is measured completed*. How Streamflow is Measured | U.S. Geological Survey. Recuperado 26 de mayo de <https://www.usgs.gov/special-topics/water-science-school/science/how-streamflow-measured>
- Utah State University. (2018). *Utah water watch*. Flow Measurements. <https://extension.usu.edu/utahwaterwatch/monitoring/field-instructions/flowmeasurements/index>

- Uzukwu, P., George, O., & Jamabo, N. (2011). The Problem of Water Seepage in Aquaculture: A Preliminary Study of the Soils of Arac Fish Farm, Omuihuechi-Aluu, Rivers State, Nigeria. *Asian Journal of Agricultural Sciences*, 3(2), 63–69.
- Verdegem, M. C., & Bosma, R. H. (2009). Water withdrawal for brackish and inland aquaculture, and options to produce more fish in ponds with present water use. *Water Policy*, 11(S1), 52–68. <https://doi.org/10.2166/wp.2009.003>
- World Meteorological Organization. (2010). *Manual on stream gauging WMO-No. 1044*. WMO. Recuperado 30 de julio de [https://library.wmo.int/doc\\_num.php?explnum\\_id=219](https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=219).
- Yavuzcan Yildiz, H., Robaina, L., Pirhonen, J., Mente, E., Domínguez, D., & Parisi, G. (2017). Fish Welfare in Aquaponic Systems: Its Relation to Water Quality with an Emphasis on Feed and Faeces—A Review. *Water*, 9(1), 13. <https://doi.org/10.3390/w9010013>
- Yoo, K., & Boyd, C. (1994). *Hydrology and water supply for Pond Aquaculture*. Chapman & Hall.

## 9. ANEXOS

**Anexo 1.** Código para la programación del sensor en el laboratorio de hidráulica en el INII de la Universidad de Costa Rica.

```
#include <SoftwareSerial.h>

const int US100_TX = 26;

const int US100_RX = 27;

SoftwareSerial US100Serial(US100_RX, US100_TX);

unsigned int MSByteDist = 0;

unsigned int LSByteDist = 0;

int mmDist;

const int numLecturas = 10;

int lecturas[numLecturas];

int lecturaActual = 0;

int total = 0;

int media = 0;

bool primeraMedia = false;

#include <LiquidCrystal_I2C.h>

int lcdColumns = 16;

int lcdRows = 2;

LiquidCrystal_I2C lcd(0x3F, lcdColumns, lcdRows);

void setup() {

    Serial.begin(9600);

    US100Serial.begin(9600);

    //Array

    for(int i = 0; i < numLecturas; i++)

    {

        lecturas[i] = 0;

    }

    lcd.init();
```



```

    lcd.backlight();
}
void loop() {
    total = total - lecturas[lecturaActual];
    US100Serial.flush();
    US100Serial.write(0x55);
    delay(500);

    if(US100Serial.available() >= 2)
    {
        MSByteDist = US100Serial.read();
        LSByteDist = US100Serial.read();
        mmDist = MSByteDist * 256 + LSByteDist;
    }
    lecturas[lecturaActual] = mmDist;
    total = total + lecturas[lecturaActual];
    lecturaActual = lecturaActual + 1;
    if (lecturaActual >= numLecturas)
    {
        primeraMedia = true;
        lecturaActual = 0;
    }
    media = total / numLecturas;
    if (primeraMedia)
    {
        Serial.print("Promedio de las últimas 10 medidas:");
        Serial.print(media);
        Serial.println("mm");
    }
}

```

```
lcd.setCursor(0, 0);  
lcd.print("Promedio:");  
lcd.setCursor(0,1);  
lcd.print(media);  
lcd.print("mm");  
}
```

**Anexo 2.** Código para la programación del sensor en las pruebas de campo, conectado a Arduino IoT.

```
// CurieSoftwareSerial for arc32 - Version: Latest
```

```
#include <SoftwareSerial.h>
```

```
// DHT sensor library - Version: Latest
```

```
#include <DHT.h>
```

```
#include <DHT_U.h>
```

```
/*
```

Sketch generated by the Arduino IoT Cloud Thing "Untitled"

<https://create.arduino.cc/cloud/things/58d604c5-7352-4961-ae6d-ffbf953c9f6>

Arduino IoT Cloud Variables description

The following variables are automatically generated and updated when changes are made to the Thing

```
float humedad;
```

```
float temperatura;
```

```
int distancia;
```

Variables which are marked as READ/WRITE in the Cloud Thing will also have functions

which are called when their values are changed from the Dashboard.

These functions are generated with the Thing and added at the end of this sketch.

```
*/
```

```
#include "thingProperties.h"
```

```
#define DHTPIN 25          // pin DATA de DHT22 en pin 4
```

```
DHT dht(DHTPIN,DHT11);    // crea objeto
```

```
const int US100_TX = 26;
```

```
const int US100_RX = 27;
```

```
SoftwareSerial US100Serial(US100_RX, US100_TX);
```

```
unsigned int MSByteDist = 0;
```

```
unsigned int LSByteDist = 0;
```

```
void setup() {
```

```
  // Initialize serial and wait for port to open:
```

```
  Serial.begin(9600);
```

```
  // This delay gives the chance to wait for a Serial Monitor without blocking if none is found
```

```
  delay(1500);
```

```
  dht.begin();           // inicializa sensor
```

```
  US100Serial.begin(9600);
```

```
  // Defined in thingProperties.h
```

```
  initProperties();
```

```
  // Connect to Arduino IoT Cloud
```

```
  ArduinoCloud.begin(ArduinoIoTPreferredConnection);
```

```
/*
```

The following function allows you to obtain more information related to the state of network and IoT Cloud connection and errors the higher number the more granular information you'll get.

The default is 0 (only errors).

Maximum is 4

```
*/
```

```
setDebugMessageLevel(2);
```

```
ArduinoCloud.printDebugInfo();
```

```
}
```

```
void loop() {
```

```
  ArduinoCloud.update();
```

```
  temperatura = dht.readTemperature();    // obtiene temperatura y almacena en variable
```

```
  humedad = dht.readHumidity();           // obtiene humedad y almacena en variable
```

```
  delay(2000);
```

```
  US100Serial.flush();
```

```
  US100Serial.write(0x55);
```

```
  delay(2000);
```

```
  if(US100Serial.available() >= 2)
```

```
  {
```

```
    MSByteDist = US100Serial.read();
```

```
    LSByteDist = US100Serial.read();
```

```
    distancia = MSByteDist * 256 + LSByteDist;
```

```

if((distancia > 1) && (distancia < 10000))
{
  Serial.print("Distance: ");
  Serial.print(distancia, DEC);
  Serial.println(" mm");

}

```

**Anexo 3.** Código del sensor usado para la programación del prototipo del sensor y su montaje en físico.

```

//Definición de variables del sensor ultrasónico
#include <SoftwareSerial.h>; //Librería que permite la comunicación serial
#include <WiFi.h>; //Librería de conexión WiFi del módulo ESP32
#include <ThingyESP32.h>; //Librería de la plataforma thinger.io

//Variables Deep Sleep
#define uS_TO_S_FACTOR 1000000 //Conversión de microsegundos a milisegundos
#define TIME_TO_SLEEP 960 //Tiempo en que el ESP32 irá a dormir en segundos

// Parámetros del conexión con Thingy.io
#define usuario "juanulloamora" //Usuario creado en plataforma Thingy.io
#define device_Id "ESP32" //Número de dispositivo creado en plataforma Thingy.io
#define device_credentials "Gvd+Q9HVMV$e-NMpN" //Número de credencial creado en
plataforma Thingy.io

ThingyESP32 thing(usuario, device_Id, device_credentials);

// Parámetros de conexión WiFi
const char WiFi_ssid[]="Martin"; //Nombre de la red Wi-Fi
const char WiFi_password[]="lulu1980"; //Clave de la red Wi-Fi

```

```

const int US100_TX = 26; //Asignación del pin 26 del ESP32 para TX
const int US100_RX = 27; //Asignación del pin 26 del ESP32 para RX

SoftwareSerial US100Serial(US100_RX, US100_TX);

unsigned int MSByteDist = 0; //Variable para el cálculo del nivel del agua, se inicia con cero
unsigned int LSByteDist = 0; //Variable para el cálculo del nivel del agua, se inicia con cero
double mmDist; //Variable de respuesta del sensor US-100
//Número de toma de datos que se toman del nivel del agua
const int numLecturas = 10;
//Variables necesarias para calcular el nivel y caudal de agua
int lecturas[numLecturas];
int lecturaActual = 0;
double total = 0;
double media = 0;
double caudal = 0;
double altura = 0;
double caudal1 = 0;
bool primeraMedia = false;
double altcamp = 1.80; //Valor importante que se debe modificar cuando se hacen verificaciones en
campo
void setup() {
    Serial.begin(9600); //Se empieza la comunicación serial en Arduino IDE
    US100Serial.begin(9600); //Se empieza la comunicación serial con el US-100
    //Bucle que itera hasta que se tenga una medición menor al número de lecturas
    for(int i = 0; i < numLecturas; i++)
    {
        lecturas[i] = 0; //Posiciones de los elementos del array
    }
}

```

```

}
// Inicialización del Wi-Fi para comunicarse con Thinger.io
thing.add_wifi(WiFi_ssid, WiFi_password);
// Inicialización de la lectura de datos desde Thinger.io
thing["esp32"] >> [](pson& out){
out["Altura_agua"] = altura;
out["Caudal"] = caudal1;
};
}
void loop(){
total = total - lecturas[lecturaActual];
thing.handle();
US100Serial.flush();
US100Serial.write(0x55);
delay(500);
if(US100Serial.available() >= 2)
{
MSByteDist = US100Serial.read();
LSByteDist = US100Serial.read();
mmDist = MSByteDist * 256 + LSByteDist;
}
lecturas[lecturaActual] = mmDist; //Se almacena la distancia en el Array
total = total + lecturas[lecturaActual]; // Se añade la lectura al total
lecturaActual = lecturaActual + 1; //Se avanza hacia la siguiente lectura del Array
if (lecturaActual >= numLecturas) //Se comprueba si se está en la última lectura del Array
{
primeraMedia = true;
lecturaActual = 0;
}
}

```

```

media = total / numLecturas; // Se calcula el promedio
altura = altcamp-(media/1000);
caudal = pow(altura,0.55);
caudal1 = 0.6975*caudal; //Se calcula el caudal con las funciones que se calcularon en el escrito
thing.write_bucket("DATOS_ESP32", "esp32");
esp_sleep_enable_timer_wakeup(TIME_TO_SLEEP * uS_TO_S_FACTOR);
Serial.println("Setup ESP32 to sleep for every " + String(TIME_TO_SLEEP) + " Seconds");
Serial.println("Going to sleep now");
Serial.flush();
esp_deep_sleep_start();
Serial.println("This will never be printed");

```

**Anexo 4.** Datos meteorológicos para los meses de marzo, abril y mayo para el año 2021, obtenidos de la estación meteorológica propiedad de Aquacorporación Internacional.

Año	Mes	Temperatura máxima (°C)	Temperatura mínima (°C)	Humedad relativa promedio (%)	Velocidad del viento promedio (m/s)	Horas sol (h)	ET <sub>o</sub> (mm/mes)	E estanques (mm/mes)
2021	Marzo	34,20	23,70	63,97	1,42	9,80	155,70	126,12
2021	Abril	34,80	22,30	72,27	0,98	8,70	153,21	124,10
2021	Mayo	33,90	22,60	75,25	0,79	6,50	150,09	121,57

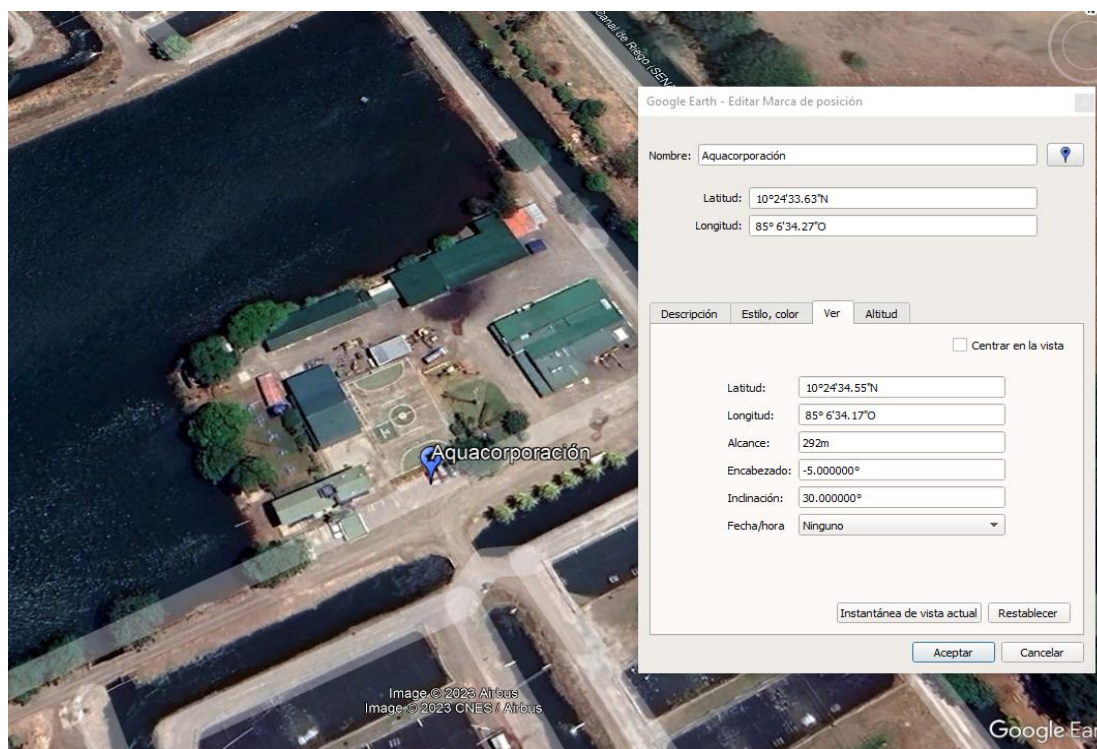
**Anexo 5.** Datos meteorológicos para los meses de marzo, abril y mayo para el año 2022, obtenidos de la estación meteorológica propiedad de Aquacorporación Internacional.

Año	Mes	Temperatura máxima (°C)	Temperatura mínima (°C)	Humedad relativa promedio (%)	Velocidad del viento promedio (m/s)	Horas sol (h)	ET <sub>o</sub> (mm/mes)	E estanques (mm/mes)
2022	Marzo	34,70	23,30	64,71	1,27	9,80	154,24	124,93
2022	Abril	35,60	21,60	69,79	0,91	8,70	152,97	123,91
2022	Mayo	36,10	22,40	83,94	0,49	6,50	150,61	121,99



**Anexo 6.** Datos meteorológicos para los meses de marzo, abril y mayo para el año 2023, obtenidos de la estación meteorológica propiedad de Aquacorporación Internacional.

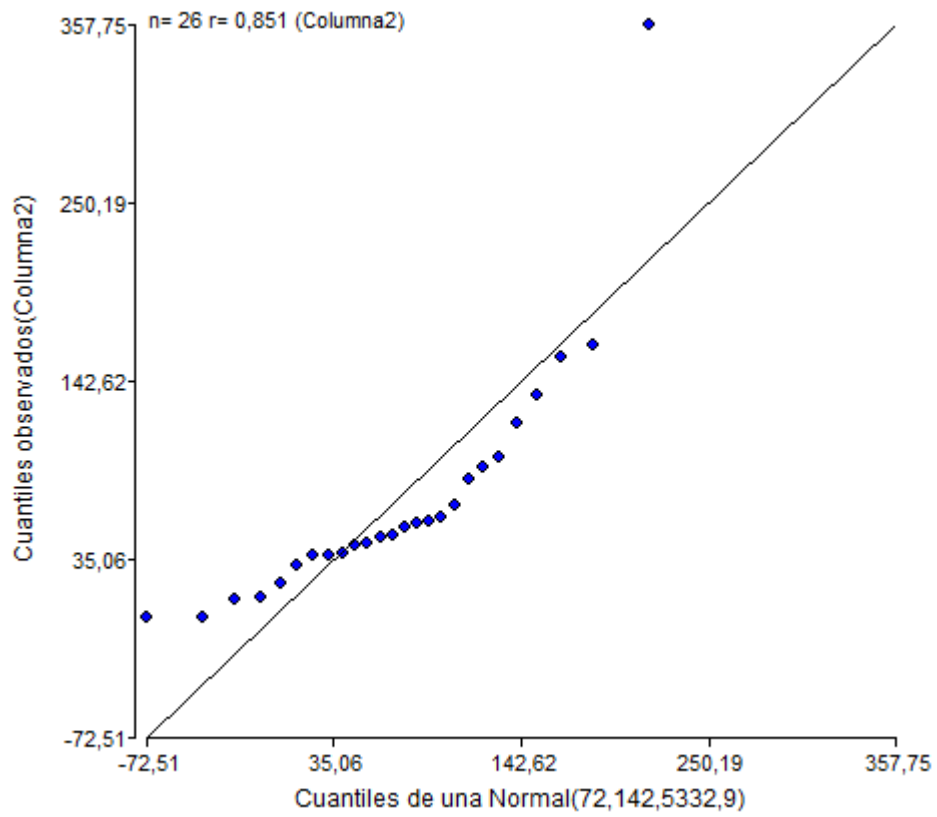
Año	Mes	Temperatura máxima (°C)	Temperatura mínima (°C)	Humedad relativa promedio (%)	Velocidad del viento promedio (m/s)	Horas sol (h)	ET <sub>o</sub> (mm/mes)	E estanques (mm/mes)
2023	Marzo	34,80	22,40	70,02	1,21	9,80	149,09	120,76
2023	Abril	36,90	22,70	68,48	1,06	8,70	160,39	129,92
2023	Mayo	37,40	23,30	72,00	0,80	6,50	160,45	129,96



**Anexo 7.** Coordenadas geográficas de Aquacorporación Internacional S.A.

**Anexo 8.** Brillo solar en el Ingenio Taboga (zona más cercana a la zona de estudio). Modificado de IMN (2013).

Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio
9,4	9,9	9,8	8,7	6,5	5,5	5,6
Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Anual	Estación
5,6	5,3	5,5	6,4	8,1	7,2	Ingenio Taboga (1984-2012)



**Anexo 9.** Gráfico de normalidad de los datos de infiltración.

**Shapiro-Wilks (modificado)**

Variable	n	Media	D.E.	W*	p(Unilateral D)
Columnal	30	72,33	68,87	0,78	<0,0001

**Anexo 10.** Prueba de normalidad de Shapiro-Wilks.

**Anexo 11.** Prueba de Shapiro-Wilks para los datos de infiltración, realizado en el programa Infostat.

**Shapiro-Wilks (modificado)**

Variable	n	Media	D.E.	W*	p(Unilateral D)
Infiltración (mm/día)	30	72,33	68,87	0,78	<0,0001

**Prueba de Kruskal Wallis**

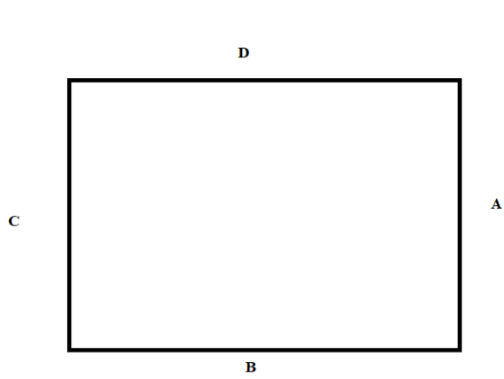
Variable	Estanque	N	Medias	D.E.	Medianas	H	p
Infiltración (mm/día)	34,00	3	51,15	6,51	48,65	17,15	0,0463
Infiltración (mm/día)	60,00	3	14,19	15,78	11,40		
Infiltración (mm/día)	94,00	3	124,90	30,25	120,34		
Infiltración (mm/día)	160,00	3	53,03	26,74	38,30		
Infiltración (mm/día)	167,00	3	81,86	71,35	43,38		
Infiltración (mm/día)	176,00	3	43,08	23,47	40,52		
Infiltración (mm/día)	520,00	3	178,49	157,87	117,54		
Infiltración (mm/día)	525,00	3	49,57	4,57	49,57		
Infiltración (mm/día)	526,00	3	34,19	48,87	12,41		
Infiltración (mm/día)	535,00	3	92,85	38,87	87,15		

Trat.	Ranks
60,00	3,50 A
526,00	9,50 A B
176,00	11,67 A B C
160,00	12,33 A B C D
525,00	14,33 A B C D
34,00	15,00 A B C D
167,00	16,00 A B C D
535,00	22,00 B C D
520,00	24,67 C D
94,00	26,00 D

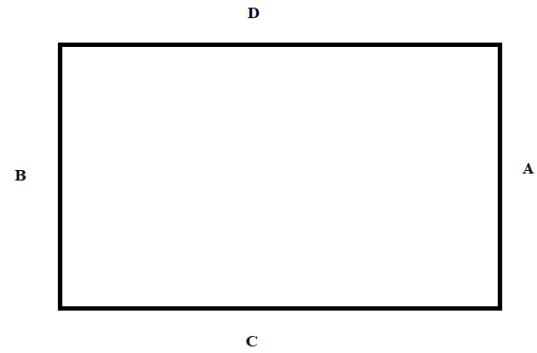
Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0,05$ )

**Anexo 12.** Medidas de los lados de los estanques 71, 60, 73 y 63.

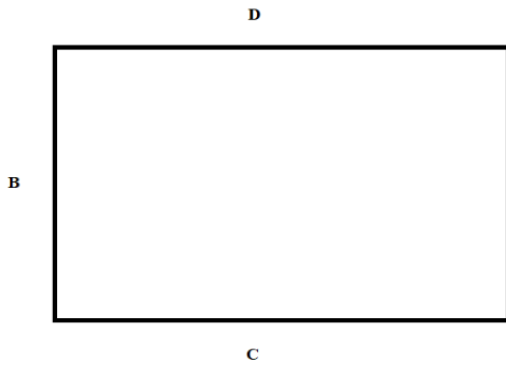
Medida (m)	Estanque 71	Estanque 60 Genética	Estanque 73	Estanque 63
Lado A	76,70	35,00	110,20	150,50
Lado B	56,00	30,00	101,00	136,00
Lado C	71,70	31,20	94,10	55,00
Lado D	57,30	29,60	92,20	63,70



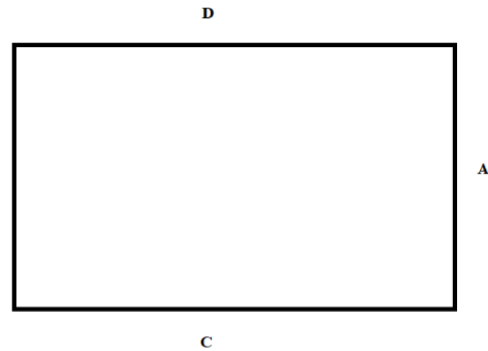
**13.a**



**13.b**



**13.c**



**13.d**

**Anexo 13.** Croquis de los estanques a los que se les tomó la medida de sus lados a) estanque 71, b) estanque 60, c) estanque 63 y d) estanque 73, dibujos no a escala.

**Anexo 14.** Largos y anchos promedios de los estanques 71, 60, 73 y 63.

<b>Promedio largo (m)</b>	56,65	30,40	105,60	143,25
<b>Promedio ancho (m)</b>	74,20	32,50	93,15	59,35
<b>Área (m<sup>2</sup>)</b>	4203,43	988,00	9836,64	8501,89

**Anexo 15.** Áreas reportadas de los estanques en la Finca Madre.

Estanque	Área (m <sup>2</sup> )	Estanque	Área (m <sup>2</sup> )	Estanque	Área (m <sup>2</sup> )	Estanque	Área (m <sup>2</sup> )
0	1 400	38	1 500	64	1 600	124	14 350
1	1 400	39	1 100	65	1 600	125	5 300
2	1 400	40	1 100	66	1 600	126	5 300
3	700	41	1 650	67	1 600	127	5 300
4	700	76	1 700	68	1 000	128	12 200
5	700	77	1 500	69	4 400	149	2 000
6	700	78	1 500	70	4 200	150	1 900
7	700	79	1 500	71	4 100	129	600
8	700	80	1 700	72	9 450	130	600
9	700	90	1 500	73	8 650	131	600
10	700	91	1 350	74	8 000	132	600
11	700	92	1 350	75	10 400	133	600
12	700	93	1 350	100	1 600	134	600
45	470	94	1 500	101	650	135	600
13	800	95	1 700	102	650	136	600
14	800	96	1 500	103	650	137	600
15	800	97	1 500	104	650	138	600
16	800	98	1 500	105	650	139	600
17	800	99	1 700	106	650	140	600
18	800	46	43 524	107	650	141	600
18	800	47	650	108	650	142	600
20	800	48	650	109	650	143	600
21	800	49	650	110	650	144	600
22	800	50	650	111	650	145	600
23	800	51	650	112	650	146	600
24	800	52	650	113	650	147	600
25	800	53	650	114	650	148	600
26	800	54	650	115	650	151	6 500
27	800	55	650	116	650	152	6 900
28	800	56	650	117	650	153	6 900
29	1 400	57	650	118	650	154	7 000
30	1 300	58	3 500	119	650	81	1 600
31	1 700	59	2 200	120	650	82	1 550
32	5 700	60	1 100	121	2 700	83	1 550
33	6 900	61	-	122	2 500	84	1 550
34	9 100	63	8 000	123	1 800	85	1 550

<b>Estanque</b>	<b>Área (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Estanque</b>	<b>Área (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Estanque</b>	<b>Área (m<sup>2</sup>)</b>
86	1 575	513	15 000	549	11 000
155	11 200	514	15 000	550	13 000
156	11 300	515	15 000	551	11 000
157	12 100	516	15 000		
158	10 300	517	15 000		
159	11 000	518	15 000		
160	22 500	519	15 000		
161	14 000	520	15 000		
162	12 500	521	15 000		
163	20 000	522	13 000		
164	20 400	523	13 000		
165	23 500	524	10 000		
166	23 500	525	9 500		
167	23 500	526	9 500		
168	23 500	527	9 500		
169	23 500	528	9 300		
170	13 500	529	10 000		
171	22 500	530	10 000		
172	22 800	531	15 000		
173	21 500	532	15 000		
174	20 000	533	15 000		
175	20 000	534	15 000		
176	19 200	535	15 000		
177	14 500	536	15 000		
501	15 000	537	9 000		
502	15 000	538	15 000		
503	15 000	539	15 000		
504	15 000	540	15 000		
505	15 000	541	15 000		
506	15 000	542	23 000		
507	15 000	543	13 000		
508	15 000	544	15 000		
509	15 000	545	15 000		
510	15 000	546	15 000		
511	15 000	547	15 000		
512	15 000	548	11 000		

**Anexo 16.** Datos para calcular el volumen de agua perdido en los estanques acuícolas para los meses de marzo, abril y mayo.

<b>Evaporación en los estanques (Ee)</b>						
<b>Espejo total de agua (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Ee marzo (mm/mes)</b>	<b>Ee abril (mm/mes)</b>	<b>Ee mayo (mm/mes)</b>	<b>V de agua perdido marzo (m<sup>3</sup>/mes)</b>	<b>V de agua perdido abril (m<sup>3</sup>/mes)</b>	<b>V de agua perdido mayo (m<sup>3</sup>/mes)</b>
1444069	123,94	125,97	124,51	178975,17	181915,00	179801,75
<b>Espejo total de agua (Ha)</b>	<b>Ee marzo (m/mes)</b>	<b>Ee abril (m/mes)</b>	<b>Ee mayo (m/mes)</b>	<b>V de agua perdido marzo (Hm<sup>3</sup>/mes)</b>	<b>V de agua perdido abril (Hm<sup>3</sup>/mes)</b>	<b>V de agua perdido mayo (Hm<sup>3</sup>/mes)</b>
144,41	0,12	0,13	0,12	0,18	0,18	0,18

**Anexo 17.** Datos para el cálculo del coeficiente de permeabilidad del estanque 520.

<b>Radio (cm)</b>	
1	15
2	15
3	15
4	15
<b>Promedio</b>	15

<b>Tiempo (min)</b>	<b>Repetición 1</b>			<b>Repetición 2</b>			<b>Repetición 3</b>		
	<b>Altura (cm)</b>	<b>f (cm/min)</b>	<b>f (mm/h)</b>	<b>Altura (cm)</b>	<b>f (cm/min)</b>	<b>f (mm/h)</b>	<b>Altura (cm)</b>	<b>f (cm/min)</b>	<b>f (mm/h)</b>
0	28	-	-	33	-	-	29	-	-
5	27,9	0,00	2,54	30	0,12	69,26	29	0,00	0,00
10	27,8	0,00	2,55	29,5	0,02	12,08	29	0,00	0,00
15	27,7	0,00	2,55	28,7	0,03	19,67	28,8	0,01	4,95
20	27,6	0,00	33,00	28	0,03	17,57	28,8	0,00	0,00
25	27,5	0,00	2,57	27,7	0,01	7,64	28,8	0,00	0,00
30	27,5	0,00	0,00	27,5	0,01	5,13	28,6	0,01	4,97
35	27,5	0,00	0,00	27	0,02	12,95	28,6	0,00	0,00
40	27,3	0,01	5,16	26,8	0,01	5,23	28,4	0,01	5,00
45	27,1	0,01	5,19	26,5	0,01	7,91	28,4	0,00	0,00
50	27	0,00	2,60	26	0,02	13,33	28,2	0,01	5,03
55	27	0,00	0,00	26	0,00	0,00	28	0,01	5,06
60	26,9	0,00	2,61	25,7	0,01	8,10	27,8	0,01	5,08
		<b>Promedio</b>	4,90		<b>Promedio</b>	14,91		<b>Promedio</b>	2,51

**Anexo 18.** Datos para el cálculo del coeficiente de permeabilidad del estanque 60.

<b>Radio (cm)</b>	
1	16,5
2	19
3	17,5
4	16,5
<b>Promedio</b>	<b>17,375</b>

<b>Tiempo (min)</b>	<b>Repetición 1</b>			<b>Repetición 2</b>			<b>Repetición 3</b>		
	<b>Altura (cm)</b>	<b>f (cm/min)</b>	<b>f (mm/h)</b>	<b>Altura (cm)</b>	<b>f (cm/min)</b>	<b>f (mm/h)</b>	<b>Altura (cm)</b>	<b>f (cm/min)</b>	<b>f (mm/h)</b>
0	12,2	-	-	25	-	-	28	-	-
5	12,2	0,00	0,00	25	0,00	0,00	28	0,00	0,00
10	12,2	0,00	0,00	25	0,00	0,00	28	0,00	0,00
15	12,2	0,00	0,00	24,9	0,01	3,10	28	0,00	0,00
20	12,2	0,00	0,00	24,9	0,00	0,00	28	0,00	0,00
25	12,2	0,00	0,00	24,9	0,00	0,00	27,9	0,00	2,85
30	12,2	0,00	0,00	24,9	0,00	0,00	27,9	0,00	0,00
35	12,2	0,00	0,00	24,6	0,02	9,35	27,9	0,00	0,00
40	12,2	0,00	0,00	24,5	0,01	3,14	27,9	0,00	0,00
45	12,2	0,00	0,00	24,5	0,00	0,00	27,8	0,00	2,85
50	12,2	0,00	0,00	24,5	0,00	0,00	27,8	0,00	0,00
55	12,2	0,00	0,00	24,5	0,00	0,00	27,8	0,00	0,00
60	12,2	0,00	0,00	24,5	0,00	0,00	27,8	0,00	0,00
		<b>Promedio</b>	<b>0,00</b>		<b>Promedio</b>	<b>1,30</b>		<b>Promedio</b>	<b>0,47</b>



**Anexo 19.** Datos para el cálculo del coeficiente de permeabilidad del estanque 535.

<b>Radio (cm)</b>	
1	15
2	15
3	15
4	15
<b>Promedio</b>	15

<b>Tiempo (min)</b>	<b>Repetición 1</b>			<b>Repetición 2</b>		
	<b>Altura (cm)</b>	<b>f (cm/min)</b>	<b>f (mm/h)</b>	<b>Altura (cm)</b>	<b>f (cm/min)</b>	<b>f (mm/h)</b>
0	27,70	-	-	24,5	-	-
5	27,50	0,01	5,13	24,5	0,00	0,00
10	27,40	0,00	2,58	24,1	0,02	11,32
15	27,30	0,00	2,58	23,8	0,01	8,59
20	27,20	0,00	2,59	23,6	0,01	5,77
25	27,10	0,00	2,60	23,2	0,02	11,65
30	27,00	0,00	2,60	23	0,01	5,88
35	27,00	0,00	0,00	22,9	0,00	2,96
40	26,90	0,00	2,61	22,8	0,00	2,97
45	26,90	0,00	0,00	22,6	0,01	5,96
50	26,80	0,00	2,62	22,4	0,01	6,00
55	26,70	0,00	2,63	22,3	0,01	3,02
60	26,60	0,00	2,64	22,2	0,01	3,03
		<b>Promedio</b>	2,38		<b>Promedio</b>	5,59

**Anexo 20.** Datos para el cálculo del coeficiente de permeabilidad del estanque 176.

<b>Radio (cm)</b>	
1	15
2	15
3	15
4	15
<b>Promedio</b>	<b>15</b>

<b>Tiempo (min)</b>	<b>Repetición 1</b>			<b>Repetición 2</b>		
	<b>Altura (cm)</b>	<b>f (cm/min)</b>	<b>f (mm/h)</b>	<b>Altura (cm)</b>	<b>f (cm/min)</b>	<b>f (mm/h)</b>
0	25,00	-	-	27	-	-
5	24,80	0,01	5,56	27	0,00	0,00
10	24,60	0,01	5,59	27	0,00	0,00
15	24,50	0,00	2,81	27	0,00	0,00
20	24,50	0,00	0,00	27	0,00	0,00
25	24,40	0,00	2,82	27	0,00	0,00
30	24,30	0,00	2,83	26,9	0,00	2,61
35	24,10	0,01	5,68	26,8	0,00	2,62
40	24,00	0,00	2,85	26,7	0,00	2,63
45	24,00	0,00	0,00	26,7	0,00	0,00
50	23,90	0,00	2,86	26,7	0,00	0,00
55	23,90	0,00	0,00	26,6	0,00	2,64
60	23,80	0,00	2,87	26,6	0,00	0,00
		<b>Promedio</b>	<b>2,82</b>		<b>Promedio</b>	<b>0,87</b>

**Anexo 21.** Datos para el cálculo del coeficiente de permeabilidad del estanque 526.

<b>Radio (cm)</b>	
1	15
2	15
3	15
4	15
<b>Promedio</b>	<b>15</b>

<b>Tiempo (min)</b>	<b>Repetición 1</b>			<b>Repetición 2</b>			<b>Repetición 3</b>		
	<b>Altura (cm)</b>	<b>f (cm/min)</b>	<b>f (mm/h)</b>	<b>Altura (cm)</b>	<b>f (cm/min)</b>	<b>f (mm/h)</b>	<b>Altura (cm)</b>	<b>f (cm/min)</b>	<b>f (mm/h)</b>
0	30	-	-	21,6	-	-	25	-	-
5	29,9	0,00	2,40	21,5	0,01	3,10	25	0,00	0,00
10	29,8	0,00	2,41	21,5	0,00	0,00	25	0,00	0,00
15	29,8	0,00	0,00	21,4	0,01	3,11	25	0,00	0,00
20	29,8	0,00	33,00	21,4	0,00	0,00	25	0,00	0,00
25	29,7	0,00	2,42	21,4	0,00	0,00	25	0,00	0,00
30	29,7	0,00	0,00	21,4	0,00	0,00	25	0,00	0,00
35	29,6	0,00	2,42	21,4	0,00	0,00	25	0,00	0,00
40	29,5	0,00	2,43	21,4	0,00	0,00	25	0,00	0,00
45	29,5	0,00	0,00	21,4	0,00	0,00	25	0,00	0,00
50	29,5	0,00	0,00	21,4	0,00	0,00	25	0,00	0,00
55	29,5	0,00	0,00	21,4	0,00	0,00	25	0,00	0,00
60	29,5	0,00	0,00	21,4	0,00	0,00	25	0,00	0,00
		<b>Promedio</b>	<b>3,76</b>		<b>Promedio</b>	<b>0,52</b>		<b>Promedio</b>	<b>0,00</b>

**Anexo 22.** Datos para el cálculo del coeficiente de permeabilidad del estanque 160.

<b>Radio (cm)</b>	
1	15
2	15
3	15
4	15
<b>Promedio</b>	<b>15</b>

<b>Tiempo (min)</b>	<b>Repetición 1</b>			<b>Repetición 2</b>			<b>Repetición 3</b>		
	<b>Altura (cm)</b>	<b>f (cm/min)</b>	<b>f (mm/h)</b>	<b>Altura (cm)</b>	<b>f (cm/min)</b>	<b>f (mm/h)</b>	<b>Altura (cm)</b>	<b>f (cm/min)</b>	<b>f (mm/h)</b>
0	33	-	-	21	-	-	27	-	-
5	33	0,00	0,00	21	0,00	0,00	27	0,00	0,00
10	32,9	0,00	2,22	20,9	0,01	3,16	27	0,00	0,00
15	32,9	0,00	0,00	20,9	0,00	0,00	27	0,00	0,00
20	32,8	0,00	33,00	20,8	0,01	3,17	26,9	0,00	2,61
25	32,7	0,00	2,24	20,8	0,00	0,00	26,9	0,00	0,00
30	32,7	0,00	0,00	20,7	0,01	3,19	26,9	0,00	0,00
35	32,7	0,00	0,00	20,7	0,00	0,00	26,9	0,00	0,00
40	32,6	0,00	2,24	20,6	0,01	3,20	26,7	0,01	5,25
45	32,6	0,00	0,00	20,5	0,01	3,21	26,7	0,00	0,00
50	32,6	0,00	0,00	20,5	0,00	0,00	26,7	0,00	0,00
55	32,5	0,00	2,25	20,5	0,00	0,00	26,3	0,02	10,59
60	32,5	0,00	0,00	20,4	0,01	3,22	26,3	0,00	0,00
		<b>Promedio</b>	<b>3,50</b>		<b>Promedio</b>	<b>1,60</b>		<b>Promedio</b>	<b>1,54</b>

**Anexo 23.** Datos para el cálculo del coeficiente de permeabilidad del estanque 525.

<b>Radio (cm)</b>	
1	15
2	15
3	15
4	15
<b>Promedio</b>	<b>15</b>

<b>Tiempo (min)</b>	<b>Repetición 1</b>			<b>Repetición 2</b>			<b>Repetición 3</b>		
	<b>Altura (cm)</b>	<b>f (cm/min)</b>	<b>f (mm/h)</b>	<b>Altura (cm)</b>	<b>f (cm/min)</b>	<b>f (mm/h)</b>	<b>Altura (cm)</b>	<b>f (cm/min)</b>	<b>f (mm/h)</b>
0	33	-	-	33	-	-	33	-	-
5	32,8	0,01	4,46	32,5	0,02	11,18	33	0,00	0,00
10	32,5	0,01	6,72	32,4	0,00	2,25	32,7	0,01	6,69
15	32,5	0,00	0,00	32,4	0,00	0,00	32,5	0,01	4,49
20	32,5	0,00	0,00	32,4	0,00	0,00	32,5	0,00	0,00
25	32,3	0,01	4,51	32,3	0,00	2,26	32,4	0,00	2,25
30	32,3	0,00	0,00	32,2	0,00	2,26	32,4	0,00	0,00
35	32,2	0,00	2,26	32,2	0,00	0,00	32,3	0,00	2,26
40	32,1	0,00	2,27	32,2	0,00	0,00	32,2	0,00	2,26
45	32	0,00	2,28	32,1	0,00	2,27	32	0,01	4,55
50	32	0,00	0,00	32,1	0,00	0,00	31,8	0,01	4,57
55	31,9	0,00	2,28	32	0,00	2,28	31,8	0,00	0,00
60	31,9	0,00	0,00	32	0,00	0,00	31,8	0,00	0,00
		<b>Promedio</b>	<b>2,07</b>		<b>Promedio</b>	<b>1,88</b>		<b>Promedio</b>	<b>2,26</b>

**Anexo 24.** Datos para el cálculo del coeficiente de permeabilidad del estanque 34.

<b>Radio (cm)</b>	
1	15
2	15
3	15
4	15
<b>Promedio</b>	<b>15</b>

<b>Tiempo (min)</b>	<b>Repetición 1</b>			<b>Repetición 2</b>		
	<b>Altura (cm)</b>	<b>f (cm/min)</b>	<b>f (mm/h)</b>	<b>Altura (cm)</b>	<b>f (cm/min)</b>	<b>f (mm/h)</b>
0	30,00	-	-	30	-	-
5	29,80	0,01	4,81	29,9	0,00	2,40
10	29,60	0,01	4,84	29,7	0,01	4,83
15	29,50	0,00	2,43	29,7	0,00	0,00
20	29,50	0,00	0,00	29,7	0,00	0,00
25	29,40	0,00	2,44	29,5	0,01	4,85
30	29,40	0,00	0,00	29,4	0,00	2,44
35	29,20	0,01	4,89	29,4	0,00	0,00
40	29,00	0,01	4,92	29,3	0,00	2,44
45	29,00	0,00	0,00	29,2	0,00	2,45
50	28,90	0,00	2,47	29,2	0,00	0,00
55	28,90	0,00	0,00	29,1	0,00	2,46
60	28,80	0,00	2,48	29	0,00	2,46
		<b>Promedio</b>	<b>2,44</b>		<b>Promedio</b>	<b>2,03</b>

**Anexo 25.** Datos para el cálculo del coeficiente de permeabilidad del estanque 94.

<b>Radio (cm)</b>	
1	17,5
2	17,5
3	15
4	15
<b>Promedio</b>	<b>16,25</b>

<b>Tiempo (min)</b>	<b>Repetición 1</b>			<b>Repetición 2</b>		
	<b>Altura (cm)</b>	<b>f (cm/min)</b>	<b>f (mm/h)</b>	<b>Altura (cm)</b>	<b>f (cm/min)</b>	<b>f (mm/h)</b>
0	14,50	-	-	17,7	-	-
5	14,40	0,01	4,32	17,5	0,01	7,58
10	14,40	0,00	0,00	17	0,03	19,21
15	14,30	0,01	4,34	16,5	0,03	19,60
20	14,20	0,01	4,36	16,3	0,01	7,95
25	14,10	0,01	4,38	16	0,02	12,05
30	14,00	0,01	4,40	16	0,00	0,00
35	13,90	0,01	4,42	16	0,00	0,00
40	13,80	0,01	4,44	15,9	0,01	4,05
45	13,70	0,01	4,46	15,9	0,00	0,00
50	13,50	0,01	8,98	15,8	0,01	4,07
55	13,50	0,00	0,00	15,7	0,01	4,08
60	13,40	0,01	4,52	15,7	0,00	0,00
		<b>Promedio</b>	<b>4,05</b>		<b>Promedio</b>	<b>6,55</b>

**Anexo 26.** Datos para el cálculo del coeficiente de permeabilidad del estanque 167.

<b>Radio (cm)</b>	
1	15
2	15
3	15
4	15
<b>Promedio</b>	<b>15</b>

<b>Tiempo (min)</b>	<b>Repetición 1</b>			<b>Repetición 2</b>			<b>Repetición 3</b>		
	<b>Altura (cm)</b>	<b>f (cm/min)</b>	<b>f (mm/h)</b>	<b>Altura (cm)</b>	<b>f (cm/min)</b>	<b>f (mm/h)</b>	<b>Altura (cm)</b>	<b>f (cm/min)</b>	<b>f (mm/h)</b>
0	26	-	-	31,5	-	-	30,3	-	-
5	25,9	0,00	2,69	30,5	0,04	23,38	30,3	0,00	0,00
10	25,7	0,01	5,41	30,5	0,00	0,00	30	0,01	7,17
15	25,6	0,00	2,71	30,2	0,01	7,13	30	0,00	0,00
20	25,5	0,00	2,72	30	0,01	4,79	30	0,00	0,00
25	25,5	0,00	0,00	29,8	0,01	4,81	30	0,00	0,00
30	25,4	0,00	2,73	29,5	0,01	7,27	30	0,00	0,00
35	25,4	0,00	0,00	29,2	0,01	7,33	29,9	0,00	2,40
40	25,4	0,00	0,00	29	0,01	4,92	29,8	0,00	2,41
45	25,3	0,00	2,74	28,8	0,01	4,95	29,7	0,00	2,42
50	25,3	0,00	0,00	28,6	0,01	4,97	29,6	0,00	2,42
55	25,3	0,00	0,00	28,5	0,00	2,50	29,5	0,00	2,43
60	25,3	0,00	0,00	28,1	0,02	10,06	29,4	0,00	2,44
		<b>Promedio</b>	<b>1,58</b>		<b>Promedio</b>	<b>6,84</b>		<b>Promedio</b>	<b>1,81</b>



**Anexo 27.** Datos de infiltración para cada estanque y sus respectivas tres repeticiones.

<b>Estanque</b>	<b>Infiltración (mm/día)</b>	<b>Estanque</b>	<b>Infiltración (mm/día)</b>
94	97,19	525	49,57
94	120,34	525	45,00
94	157,18	525	54,14
167	38,01	160	83,90
167	164,19	160	38,30
167	43,38	160	36,90
535	57,15	526	90,16
535	87,15	526	12,41
535	134,26	526	0,00
60	0,00	520	117,54
60	31,18	520	357,75
60	11,40	520	60,17
34	58,54	176	67,72
34	46,25	176	40,52
34	48,65	176	20,99

**Anexo 28.** Datos para el cálculo de las pérdidas por infiltración en los canales.

<b>Canal</b>	<b>b (m)</b>	<b>L<sub>c</sub> (m)</b>	<b>y (m)</b>	<b>P<sub>m</sub> (m)</b>	<b>A<sub>m</sub> (m<sup>2</sup>)</b>	<b>S (m<sup>3</sup>/s*km),</b>	<b>Q<sub>pc</sub> (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>V<sub>ic</sub> (m<sup>3</sup>)</b>	<b>V<sub>ic</sub> (Hm<sup>3</sup>)</b>
<b>Etapa III Entrada de la finca (Parte Delantera)</b>	10,10	395,06	0,5	11,51	5,298	0,017	0,007	17590,31	0,018
<b>Etapa III Entrada de la finca (Parte de detrás, horizontal)</b>	8,37	162,59	1	9,83	8	0,020	0,003	8221,26	0,008
<b>Etapa III Entrada de la finca (Parte de detrás, vertical)</b>	10,43	370,21	0,5	11,41	5,25	0,017	0,006	16341,90	0,016
<b>Faltantes entrada la tercera A</b>	2,80	127,02	0,5	3,41	1,25	0,005	0,001	1496,28	0,001
<b>Faltantes entrada la tercera B</b>	13,93	83,44	0,5	14,41	6,75	0,022	0,002	4693,31	0,005
<b>Faltantes entrada la tercera C</b>	2,73	272,10	0,5	3,41	1,25	0,005	0,001	3205,43	0,003
<b>Faltantes entrada la tercera D</b>	3,02	388,26	0,5	4,41	1,75	0,006	0,002	6153,47	0,006
<b>Faltantes entrada la tercera E</b>	2,61	144,19	0,5	3,41	1,25	0,005	0,001	1698,61	0,002
<b>Faltantes entrada principal A</b>	7,80	388,95	1	8,83	7	0,017	0,007	17435,59	0,017
<b>Faltantes entrada principal B</b>	6,45	46,57	1	7,83	6	0,015	0,001	1819,83	0,002
<b>Faltantes entrada principal C</b>	30,21	96,86	0,5	31,41	15,25	0,048	0,005	12089,27	0,012
<b>Faltantes entrada principal D</b>	26,61	104,09	0,5	27,41	13,25	0,042	0,004	11312,06	0,011
<b>Etapa III y II Canal Largo</b>	10,82	788,14	0,5	11,41	5,25	0,017	0,013	34790,74	0,035
<b>Etapa III y II Canal Largo (bifurcación)</b>	7,10	225,97	1	8,83	7	0,017	0,004	10129,54	0,010
<b>Entrada principal parte arriba</b>	7,80	105,75	1	8,83	7	0,017	0,002	4740,55	0,005
<b>Entrada principal parte abajo</b>	9,01	81,94	1	10,83	9	0,022	0,002	4612,44	0,005
<b>Entrada principal parte abajo</b>	8,61	368,47	1	9,83	8	0,020	0,007	18631,20	0,019

<b>Entrada principal parte abajo</b>	6,96	296,21	1	7,83	6	0,015	0,004	11576,12	0,012
<b>Frente a alimentos A</b>	14,63	218,51	0,5	15,41	7,25	0,023	0,005	13171,91	0,013
<b>Frente a alimentos B</b>	14,16	491,89	0,5	15,41	7,25	0,023	0,011	29652,09	0,030
<b>Frente a alimentos C</b>	41,05	74,07	0,5	42,41	20,75	0,065	0,005	12529,55	0,013
<b>Frente a alimentos D</b>	2,38	192,02	0,5	3,41	1,25	0,005	0,001	2262,00	0,002
<b>Frente a alimentos E</b>	2,52	24,23	0,5	3,41	1,25	0,005	0,000	285,38	0,000
<b>Frente a alimentos F</b>	7,89	106,42	1	8,83	7	0,017	0,002	4770,58	0,005
<b>Frente a alimentos G</b>	9,29	184,04	1	10,83	9	0,022	0,004	10360,05	0,010
<b>Frente a alimentos A</b>	9,53	288,42	1	10,83	9	0,022	0,006	16236,02	0,016
<b>Frente a alimentos B</b>	10,54	180,77	0,5	11,41	5,25	0,017	0,003	7979,70	0,008
<b>Frente a alimentos C</b>	12,97	305,51	0,5	13,41	6,25	0,020	0,006	15951,65	0,016
<b>Frente a alimentos D</b>	15,67	104,31	0,5	16,41	7,75	0,025	0,003	6708,79	0,007
<b>Frente a alimentos E</b>	11,09	59,53	0,5	12,41	5,75	0,019	0,001	2867,81	0,003
<b>Detrás alimentos A</b>	4,08	377,31	0,5	5,41	2,25	0,008	0,003	7509,47	0,008
<b>Detrás alimentos B</b>	3,26	457,57	0,5	4,41	1,75	0,006	0,003	7252,05	0,007
<b>Detrás alimentos C</b>	3,45	110,82	0,5	4,41	1,75	0,006	0,001	1756,39	0,002
<b>Detrás alimentos D</b>	3,28	60,33	0,5	4,41	1,75	0,006	0,000	956,17	0,001
<b>Detrás alimentos E</b>	4,13	336,25	0,5	5,41	2,25	0,008	0,003	6692,35	0,007
<b>Detrás alimentos F</b>	2,38	123,03	0,5	3,41	1,25	0,005	0,001	1449,34	0,001
<b>Detrás alimentos G</b>	4,81	493,93	0,5	5,41	2,25	0,008	0,004	9830,55	0,010
<b>Detrás alimentos H</b>	6,54	492,46	1	7,83	6	0,015	0,007	19246,05	0,019
<b>Detrás alimentos I</b>	6,13	385,63	1	7,83	6	0,015	0,006	15070,98	0,015
<b>Detrás alimentos J</b>	2,55	290,29	0,5	3,41	1,25	0,005	0,001	3419,66	0,003
<b>Humedales A</b>	8,55	970,03	1	9,83	8	0,020	0,019	49048,97	0,049
<b>Humedales B</b>	3,99	1416,35	0,5	4,41	1,75	0,006	0,009	22447,81	0,022
<b>Humedales C</b>	3,17	515,68	0,5	4,41	1,75	0,006	0,003	8173,04	0,008

<b>Humedales D</b>	10,26	1919,65	0,5	11,41	5,25	0,017	0,033	84738,81	0,085
<b>Antes Humedales A</b>	7,71	1142,74	1	8,83	7	0,017	0,020	51226,63	0,051
<b>Antes Humedales B</b>	7,59	1312,83	1	8,83	7	0,017	0,023	58851,18	0,059
<b>Antes Humedales C</b>	4,10	1565,06	0,5	5,41	2,25	0,008	0,012	31149,25	0,031
<b>Faltantes luego de bodega concentrados A</b>	7,12	390,90	1	8,83	7	0,017	0,007	17523,00	0,018
<b>Faltantes luego de bodega concentrados B</b>	14,17	354,65	0,5	15,41	7,25	0,023	0,008	21379,00	0,021
<b>Faltantes luego de bodega concentrados C</b>	10,85	694,88	0,5	11,41	5,25	0,017	0,012	30673,98	0,031
<b>Faltantes luego de bodega concentrados D</b>	4,02	199,13	0,5	5,41	2,25	0,008	0,002	3963,27	0,004
<b>Faltantes luego de bodega concentrados E</b>	5,02	223,37	1	6,83	5	0,013	0,003	7442,65	0,007
<b>Faltantes luego de bodega concentrados F</b>	4,70	206,85	0,5	5,41	2,25	0,008	0,002	4116,92	0,004
<b>Suma</b>								<b>773230,99</b>	<b>0,773</b>

Nota: b: ancho del canal (m), y: tirante de agua del canal (m), pendiente del canal (m),  $P_m$ : perímetro mojado del canal (m),  $A_m$ : área mojada del canal (m), C: constante que depende del tipo del suelo del canal, S: infiltración en el canal ( $m^3/s \cdot km$ ), L: largo total del canal (m),  $Q_{pc}$ : caudal perdido en el canal ( $m^3/s$ ) y  $V_{ic}$ : volumen perdido de agua por infiltración en canales al mes ( $m^3$ ).

**Anexo 29.** Datos para el cálculo de las pérdidas por evaporación en los canales.

<b>Canal</b>	<b>V<sub>ec</sub> marzo (m<sup>3</sup>)</b>	<b>V<sub>ec</sub> abril (m<sup>3</sup>)</b>	<b>V<sub>ec</sub> mayo (m<sup>3</sup>)</b>	<b>V<sub>ec</sub> marzo (Hm<sup>3</sup>)</b>	<b>V<sub>ec</sub> abril (Hm<sup>3</sup>)</b>	<b>V<sub>ec</sub> mayo (Hm<sup>3</sup>)</b>
Etapa III Entrada de la finca (Parte Delantera)	610,22	620,24	613,03	0,00061	0,00062	0,00061
Etapa III Entrada de la finca (Parte de detrás, horizontal)	208,23	211,65	209,19	0,00021	0,00021	0,00021
Etapa III Entrada de la finca (Parte de detrás, vertical)	590,67	600,37	593,39	0,00059	0,00060	0,00059
Faltantes entrada la tercera A	54,49	55,39	54,75	0,00005	0,00006	0,00005
Faltantes entrada la tercera B	177,78	180,70	178,60	0,00018	0,00018	0,00018
Faltantes entrada la tercera C	113,66	115,53	114,19	0,00011	0,00012	0,00011
Faltantes entrada la tercera D	179,67	182,62	180,50	0,00018	0,00018	0,00018
Faltantes entrada la tercera E	57,63	58,57	57,89	0,00006	0,00006	0,00006
Faltantes entrada principal A	464,10	471,72	466,24	0,00046	0,00047	0,00047
Faltantes entrada principal B	45,98	46,73	46,19	0,00005	0,00005	0,00005
Faltantes entrada principal C	447,73	455,08	449,80	0,00045	0,00046	0,00045
Faltantes entrada principal D	423,85	430,81	425,80	0,00042	0,00043	0,00043
Etapa III y II Canal Largo	1304,44	1325,86	1310,46	0,00130	0,00133	0,00131
Etapa III y II Canal Largo (bifurcación)	245,48	249,51	246,62	0,00025	0,00025	0,00025
Entrada principal parte arriba	126,21	128,28	126,79	0,00013	0,00013	0,00013
Entrada principal parte abajo	112,98	114,83	113,50	0,00011	0,00011	0,00011

Entrada principal parte abajo	485,47	493,45	487,72	0,00049	0,00049	0,00049
Entrada principal parte abajo	315,59	320,78	317,05	0,00032	0,00032	0,00032
Frente a alimentos A	489,27	497,31	491,53	0,00049	0,00050	0,00049
Frente a alimentos B	1065,74	1083,25	1070,66	0,00107	0,00108	0,00107
Frente a alimentos C	465,21	472,85	467,36	0,00047	0,00047	0,00047
Frente a alimentos D	69,90	71,04	70,22	0,00007	0,00007	0,00007
Frente a alimentos E	9,34	9,49	9,38	0,00001	0,00001	0,00001
Frente a alimentos F	128,41	130,52	129,01	0,00013	0,00013	0,00013
Frente a alimentos G	261,60	265,90	262,81	0,00026	0,00027	0,00026
Frente a alimentos A	420,39	427,29	422,33	0,00042	0,00043	0,00042
Frente a alimentos B	291,57	296,36	292,92	0,00029	0,00030	0,00029
Frente a alimentos C	606,36	616,32	609,16	0,00061	0,00062	0,00061
Frente a alimentos D	250,02	254,13	251,18	0,00025	0,00025	0,00025
Frente a alimentos E	100,99	102,65	101,46	0,00010	0,00010	0,00010
Detrás alimentos A	235,31	239,18	236,40	0,00024	0,00024	0,00024
Detrás alimentos B	228,14	231,89	229,20	0,00023	0,00023	0,00023
Detrás alimentos C	58,54	59,50	58,81	0,00006	0,00006	0,00006
Detrás alimentos D	30,31	30,81	30,45	0,00003	0,00003	0,00003
Detrás alimentos E	212,40	215,89	213,38	0,00021	0,00022	0,00021
Detrás alimentos F	44,80	45,54	45,01	0,00004	0,00005	0,00005
Detrás alimentos G	363,14	369,11	364,82	0,00036	0,00037	0,00036

Detrás alimentos H	492,80	500,89	495,07	0,00049	0,00050	0,00050
Detrás alimentos I	361,70	367,64	363,37	0,00036	0,00037	0,00036
Detrás alimentos J	113,36	115,22	113,88	0,00011	0,00012	0,00011
Humedales A	1268,60	1289,44	1274,46	0,00127	0,00129	0,00127
Humedales B	863,92	878,11	867,91	0,00086	0,00088	0,00087
Humedales C	250,05	254,15	251,20	0,00025	0,00025	0,00025
Humedales D	3012,16	3061,63	3026,07	0,00301	0,00306	0,00303
Antes Humedales A	1347,78	1369,92	1354,01	0,00135	0,00137	0,00135
Antes Humedales B	1524,79	1549,83	1531,83	0,00152	0,00155	0,00153
Antes Humedales C	982,78	998,93	987,32	0,00098	0,00100	0,00099
Faltantes luego de bodega concentrados A	425,68	432,67	427,65	0,00043	0,00043	0,00043
Faltantes luego de bodega concentrados B	768,74	781,36	772,29	0,00077	0,00078	0,00077
Faltantes luego de bodega concentrados C	1153,35	1172,29	1158,67	0,00115	0,00117	0,00116
Faltantes luego de bodega concentrados D	122,48	124,50	123,05	0,00012	0,00012	0,00012
Faltantes luego de bodega concentrados E	171,40	174,22	172,19	0,00017	0,00017	0,00017
Faltantes luego de bodega concentrados F	148,82	151,26	149,51	0,00015	0,00015	0,00015
<b>Suma</b>	<b>24304,03</b>	<b>24703,24</b>	<b>24416,27</b>	<b>0,024</b>	<b>0,025</b>	<b>0,024</b>

$V_{ec}$  marzo: volumen de agua perdido por evaporación en los canales en marzo,  $V_{ec}$  abril: volumen de agua perdido por evaporación en los canales en abril y  $V_{ec}$  mayo: volumen de agua perdido por evaporación en los canales en mayo.

**Anexo 30.** Memoria de cálculo de la medición 1 (M1) de caudal.

Sección	Distancia (m)		Profundidad d (m)	v 0.2d (m/s)	v 0.8d (m/s)	v promedio (m/s)	Método sección intermedia	Método sección media
	Desde el punto inicial						Q subsección (m <sup>3</sup> /s)	Q subsección (m <sup>3</sup> /s)
LI	0	0	0	-	-	-	-	-
P1	0,40	0,33	0,33	0,08	0,09	0,09	0,011	0,0037
P2	0,80	0,56	0,56	0,18	0,17	0,18	0,039	0,023
P3	1,20	0,83	0,83	0,67	0,34	0,51	0,17	0,095
P4	1,60	1,22	1,22	1,02	0,50	0,76	0,37	0,26
P5	2,00	1,47	1,47	0,79	0,63	0,71	0,42	0,40
P6	2,40	1,68	1,68	1,14	0,89	1,02	0,68	0,54
P7	2,80	1,68	1,68	1,14	0,89	1,02	0,68	0,68
P8	3,20	1,64	1,64	1,18	1,02	1,10	0,72	0,70
P9	3,60	1,60	1,60	1,18	1,02	1,10	0,70	0,71
P10	4,00	1,16	1,16	1,16	1,01	1,09	0,50	0,60
P11	4,40	1,14	1,14	0,93	0,77	0,85	0,39	0,45
P12	4,80	0,86	0,86	0,83	0,90	0,87	0,30	0,34
P13	5,20	0,48	0,48	0,63	0,81	0,72	0,14	0,21
P14	5,60	0,20	0,20	0,50	0,55	0,53	0,042	0,085
P15	6,00	0,09	0,09	0,08	0,00	0,08	0,0029	0,018
LD	6,40	0	0	-	-	-	0	0,0010
						Total	5,17	5,12



**Anexo 31.** Memoria de cálculo de la medición 2 (M2) de caudal.

<b>Sección</b>	<b>Distancia (m) Desde el punto inicial</b>	<b>Profundidad d (m)</b>	<b>v 0.2d (m/s)</b>	<b>v 0.8d (m/s)</b>	<b>v promedio (m/s)</b>	<b>Método sección intermedia Q subsección (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>Método sección media Q subsección (m<sup>3</sup>/s)</b>
LI	0	0	-	-	-	-	-
P1	0,4	0,29	0,05	0,07	0,06	0,0070	0,0023
P2	0,8	0,52	0,11	0,07	0,09	0,02	0,012
P3	1,2	0,79	0,61	0,18	0,395	0,12	0,064
P4	1,6	1,18	0,85	0,37	0,61	0,29	0,20
P5	2	1,43	1,06	0,74	0,9	0,51	0,39
P6	2,4	1,64	1,05	0,36	0,705	0,46	0,49
P7	2,8	1,64	1,05	0,36	0,705	0,46	0,46
P8	3,2	1,6	1,12	0,83	0,975	0,62	0,54
P9	3,6	1,56	1,12	0,83	0,975	0,61	0,62
P10	4	1,12	1,17	1,02	1,095	0,49	0,55
P11	4,4	1,1	1,17	1,02	1,095	0,48	0,49
P12	4,8	0,82	0,86	0,68	0,77	0,25	0,36
P13	5,2	0,44	0,78	0,8	0,79	0,14	0,20
P14	5,6	0,16	0,65	0,62	0,635	0,04	0,086
P15	6	0,05	0,08	0,34	0,42	0,01	0,022
LD	6,4	0	-	-	-	0	0,0028
					<b>Total</b>	<b>4,52</b>	<b>4,49</b>

**Anexo 32.** Memoria de cálculo de la medición 3 (M3) de caudal.

Sección	Distancia (m)	Profundidad d (m)	v 0.2d (m/s)	v 0.8d (m/s)	v promedio (m/s)	Método sección intermedia	Método sección media
	Desde el punto inicial					Q subsección (m <sup>3</sup> /s)	Q subsección (m <sup>3</sup> /s)
LI	0	0	-	-	-	-	-
P1	0,40	0,35	0,050	0,080	0,065	0,0091	0,0030
P2	0,80	0,58	0,19	0,22	0,21	0,048	0,025
P3	1,20	0,85	0,61	0,18	0,40	0,13	0,086
P4	1,60	1,24	0,85	0,37	0,61	0,30	0,21
P5	2,00	1,49	1,06	0,74	0,90	0,54	0,41
P6	2,40	1,70	1,05	0,36	0,71	0,48	0,51
P7	2,80	1,70	1,05	0,36	0,71	0,48	0,48
P8	3,20	1,66	1,12	0,83	0,98	0,65	0,56
P9	3,60	1,62	1,12	0,83	0,98	0,63	0,64
P10	4,00	1,18	1,17	1,02	1,10	0,52	0,58
P11	4,40	1,16	1,17	1,02	1,10	0,51	0,51
P12	4,80	0,88	0,86	0,68	0,77	0,27	0,38
P13	5,20	0,50	0,78	0,80	0,79	0,16	0,22
P14	5,60	0,22	0,65	0,62	0,64	0,056	0,10
P15	6,00	0,11	0,080	0,34	0,42	0,0185	0,035
LD	6,40	0	-	-	-	0	0,0062
					Total	4,80	4,76

**Anexo 33.** Memoria de cálculo de la medición 4 (M4) de caudal.

Sección	Distancia	Profundidad	v 0.2d	v 0.8d (m/s)	v	Método	Método
	(m)	d (m)	(m/s)		promedio	sección	sección
	Desde el					intermedia	media
	punto					Q	Q
	inicial					subsección	subsección
						(m <sup>3</sup> /s)	(m <sup>3</sup> /s)
LI	0	0	-	-	-	-	-
P1	0,40	0,31	0,100	0,070	0,085	0,011	0,0035
P2	0,80	0,54	0,16	0,22	0,19	0,041	0,023
P3	1,20	0,81	0,78	0,69	0,74	0,24	0,12
P4	1,60	1,20	0,74	0,70	0,72	0,35	0,29
P5	2,00	1,45	1,12	1,00	1,06	0,61	0,47
P6	2,40	1,66	0,95	0,57	0,76	0,50	0,57
P7	2,80	1,66	0,95	0,57	0,76	0,50	0,50
P8	3,20	1,62	1,25	0,92	1,09	0,70	0,61
P9	3,60	1,58	1,25	0,92	1,09	0,69	0,69
P10	4,00	1,14	1,24	0,99	1,12	0,51	0,60
P11	4,40	1,12	1,24	0,99	1,12	0,50	0,50
P12	4,80	0,84	1,13	0,90	1,02	0,34	0,42
P13	5,20	0,46	1,02	0,81	0,92	0,17	0,25
P14	5,60	0,18	0,71	0,80	0,76	0,054	0,11
P15	6,00	0,07	0,30	0	0,30	0,0084	0,026
LD	6,40	0	-	-	-	0	0,0028
					Total	5,23	5,19

**Anexo 34.** Memoria de cálculo de la medición 5 (M5) de caudal.

Sección	Distancia	Profundidad	v 0.2d	v 0.8d	v	Método	Método
	(m)	d (m)	(m/s)	(m/s)	promedio	sección	sección
	Desde el					intermedia	media
	punto					Q	Q
	inicial					subsección	subsección
						(m <sup>3</sup> /s)	(m <sup>3</sup> /s)
LI	0	0	-	-	-	-	-
P1	0,40	0,39	0,070	0,080	0,075	0,012	0,0039
P2	0,80	0,62	0,25	0,21	0,23	0,057	0,031
P3	1,20	0,89	0,73	0,56	0,65	0,23	0,13
P4	1,60	1,28	0,92	0,75	0,84	0,43	0,32
P5	2,00	1,53	0,98	0,45	0,72	0,44	0,44
P6	2,40	1,74	1,02	0,74	0,88	0,61	0,52
P7	2,80	1,74	1,02	0,74	0,88	0,61	0,61
P8	3,20	1,70	1,21	0,86	1,04	0,70	0,66
P9	3,60	1,66	1,21	0,86	1,04	0,69	0,70
P10	4,00	1,22	1,11	0,91	1,01	0,49	0,59
P11	4,40	1,20	1,11	0,91	1,01	0,48	0,49
P12	4,80	0,92	0,84	0,78	0,81	0,30	0,39
P13	5,20	0,54	0,79	0,80	0,80	0,17	0,23
P14	5,60	0,26	0,58	0,55	0,57	0,059	0,11
P15	6,00	0,15	0,30	0	0,53	0,032	0,045
LD	6,40	0	-	-	-	0	0,011
					Total	5,32	5,27

**Anexo 35.** Memoria de cálculo de la medición 6 (M6) de caudal.

<b>Sección</b>	<b>Distancia (m)</b> <b>Desde el punto inicial</b>	<b>Profundidad d (m)</b>	<b>v 0.2d (m/s)</b>	<b>v 0.8d (m/s)</b>	<b>v promedio (m/s)</b>	<b>Método sección intermedia Q subsección (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>Método sección media Q subsección (m<sup>3</sup>/s)</b>
LI	0	0	-	-	-	-	-
P1	0,40	0,40	0,090	0,060	0,075	0,012	0,0040
P2	0,80	0,63	0,30	0,29	0,30	0,074	0,038
P3	1,20	0,90	0,73	0,53	0,63	0,23	0,14
P4	1,60	1,29	0,96	0,74	0,85	0,44	0,32
P5	2,00	1,54	0,97	0,83	0,90	0,55	0,50
P6	2,40	1,75	1,12	0,52	0,82	0,57	0,57
P7	2,80	1,75	1,12	0,52	0,82	0,57	0,57
P8	3,20	1,71	1,14	0,82	0,98	0,67	0,62
P9	3,60	1,67	1,14	0,82	0,98	0,65	0,66
P10	4,00	1,23	1,17	1,02	1,10	0,54	0,60
P11	4,40	1,21	1,17	1,02	1,10	0,53	0,53
P12	4,80	0,93	0,86	0,62	0,74	0,28	0,39
P13	5,20	0,55	0,78	0,60	0,69	0,15	0,21
P14	5,60	0,27	0,70	0,71	0,71	0,076	0,11
P15	6,00	0,16	0,32	0	0,32	0,020	0,044
LD	6,40	0	-	-	-	0	0,0068
					<b>Total</b>	<b>5,37</b>	<b>5,33</b>

**Anexo 36.** Memoria de cálculo de la medición 7 (M7) de caudal.

<b>Sección</b>	<b>Distancia (m)</b> <b>Desde el punto inicial</b>	<b>Profundidad d (m)</b>	<b>v 0.2d (m/s)</b>	<b>v 0.8d (m/s)</b>	<b>v promedio (m/s)</b>	<b>Método sección intermedia Q subsección (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>Método sección media Q subsección (m<sup>3</sup>/s)</b>
LI	0	0	-	-	-	-	-
P1	0,40	0,33	0,150	0,050	0,10	0,013	0,0044
P2	0,80	0,60	0,35	0,33	0,34	0,082	0,041
P3	1,20	0,74	0,74	0,55	0,65	0,19	0,13
P4	1,60	1,15	0,96	0,49	0,73	0,33	0,26
P5	2,00	1,30	0,97	0,54	0,76	0,39	0,36
P6	2,40	1,44	1,09	0,70	0,90	0,52	0,45
P7	2,80	1,78	1,05	0,57	0,81	0,58	0,55
P8	3,20	1,70	1,05	0,57	0,81	0,55	0,56
P9	3,60	1,62	1,09	0,69	0,89	0,58	0,56
P10	4,00	1,67	1,09	0,69	0,89	0,59	0,59
P11	4,40	1,25	0,86	0,41	0,64	0,32	0,45
P12	4,80	1,04	1,10	0,73	0,92	0,38	0,35
P13	5,20	0,82	0,76	0,55	0,66	0,21	0,29
P14	5,60	0,57	0,85	0,70	0,78	0,18	0,20
P15	6,00	0,30	0,68	0,62	1,30	0,16	0,18
LD	6,40	0	-	-	-	0	0,0520
					<b>Total</b>	<b>5,07</b>	<b>5,04</b>

**Anexo 37.** Memoria de cálculo caudal de la entrada de la compuerta III Etapa.

Sección	Distancia (m)	Profundidad d (m)	v 0.2d (m/s)	v 0.8d (m/s)	v promedio (m/s)	Método sección intermedia
	Desde el punto inicial					Q subsección (m <sup>3</sup> /s)
LI	0	0	-	-	-	-
P1	0,5	2,28	0,32	0,32	0,32	0,36
P2	1	2,28	0,05	0,11	0,08	0,09
P3	1,5	2,28	0,17	0,25	0,21	0,24
P4	2	2,28	0,13	0,52	0,33	0,37
P5	2,5	2,28	0,17	0,3	0,24	0,27
P6	3	2,28	0,15	0,46	0,31	0,35
LD	3,5	0	-	-	-	0
					Total	1,68

**Anexo 38.** Memoria de cálculo caudal de la salida compuerta hacia río Cañas directa.

Sección	Distancia (m)	Profundidad d (m)	v 0.2d (m/s)	v 0.8d (m/s)	v promedio (m/s)	Método sección intermedia
	Desde el punto inicial					Q subsección (m <sup>3</sup> /s)
LI	0	0	-	-	-	-
P1	0,3	1,59	1,51	0,12	0,82	0,39
P2	0,6	1,59	1,85	0,23	1,04	0,50
P3	0,9	1,59	1,15	0,9	1,03	0,49
P4	1,2	1,51	1,2	0,13	0,67	0,30
P5	1,5	1,51	0,5	0,3	0,4	0,18
P6	1,8	1,51	0,12	0,1	0,11	0,05
P7	2,1	1,51	0,33	0,28	0,31	0,14
P8	2,4	1,48	0,25	0,17	0,21	0,09
LD	2,7	1,48	0	0	0	0
					Total	2,14

**Anexo 39.** Memoria de cálculo caudal de la salida compuerta Santa Paula.

Sección	Distancia (m)	Profundidad d (m)	v 0.2d (m/s)	v 0.8d (m/s)	v promedio (m/s)	Método sección intermedia
	Desde el punto inicial					Q subsección (m <sup>3</sup> /s)
LI	0	1,69	-	-	-	-
P1	0,3	1,7	0,13	0,11	0,12	0,06
P2	0,6	1,69	0,43	0,80	0,62	0,31
P3	0,9	1,7	0,21	0,22	0,22	0,11
P4	1,2	1,71	0,6	0,7	0,65	0,33
LD	1,27	1,69	-	-	-	0
<b>Total</b>						0,82

**Anexo 40.** Memoria de cálculo caudal de salida compuerta hacia río Cañas CD9-2.

Sección	Distancia (m)	Profundidad d (m)	v 0.2d (m/s)	v 0.8d (m/s)	v promedio (m/s)	Método sección intermedia
	Desde el punto inicial					Q subsección (m <sup>3</sup> /s)
LI	0	0	-	-	-	-
P1	0,5	0,245	1,16	1,16	1,16	0,14
P2	1	0,245	1,1	1,10	1,10	0,13
LD	1,48	0	-	-	-	0
<b>Total</b>						0,28

**Anexo teórico 1.** Número de divisiones para la toma de verticales

Según el USBR (2001), las divisiones se pueden realizar a cualquier distancia entre ellas mientras se cumplan los criterios siguientes.

-El error cuando se calcule el área entre las distancias verticales, no debe exceder el 3% cuando el lecho se trata como líneas rectas entre las verticales.

-A excepción de los bancos, la diferencia entre las velocidades medias en las verticales no debe de exceder el 20% en relación con la velocidad inferior de un par de verticales.

Por su parte Yoo & Boyd (1994) recomiendan realizar las divisiones cada 0,6-3 m dependiendo del largo del canal. Por su parte Uribe (2019), realiza las siguientes recomendaciones dependiendo del largo del canal (cuadro 23). El número de divisiones se basará en los criterios antes mencionados y la posibilidad de campo de realizar las lecturas de la velocidad del agua.



**Cuadro 21.** Recomendaciones para dividir un canal en secciones dependiendo del largo.

Ancho total del canal (T)	n
Menos de 1 m	4
1-2 m	6
2-4 m	10
4-8 m	16
8-10 m	20
Más de 10 m	24

Fuente: Uribe (2019).

Por otra parte, según la Oficina de Estándares Indios (BIS, por sus siglas en inglés) (2001), se recomienda un mínimo 25 verticales para asegurar una buena definición del perfil de la sección transversal ya sea para ríos pequeños o grandes. En el cuadro 24, se presentan el error relativo al utilizar cierta cantidad de verticales al medir el caudal en secciones irregulares. Por otra parte, en el cuadro 25, se muestra el número recomendado de verticales para canales artificiales, con un perfil de la sección transversal regular.

**Cuadro 22.** Error relativo al escoger un número determinado de verticales para un río ancho con un perfil transversal irregular.

Capacidad del canal	Ancho aproximado	Número de verticales
Por arriba de 85 m <sup>3</sup> /s	Por arriba de 35 m	11
Entre 15 y 85 m <sup>3</sup> /s	Entre 15 y 35 m	9
Menos de 15 m <sup>3</sup> /s	Hasta 15 m	5

Fuente: BIS (2001).

**Cuadro 23.** Número de verticales recomendadas en canales artificiales con perfil transversal bien definido y regular, para asegurar un nivel de incertidumbre menor al  $\pm 4\%$  (nivel de confianza del 95%).

Número de verticales	Incetidumbre (95% de confianza)
Menos de 10	Más de 9
15	6
20	5
25	4
30	3
50	1 a 2

Fuente: BIS (2001).

Otras recomendaciones realizadas por la Universidad Estatal de Utah en Estados Unidos (2018) es si el ancho del canal o río es menor a 10 pies, se recolectan datos cada 0,5 pies y se toma la primera

lectura a los 0,25 pies. Si el ancho del canal o río es mayor a 10 pies se recolectan datos a un intervalo de “x” distancia al dividir el canal en 20 divisiones y la primera lectura se toma a la mitad del intervalo.

## **Anexo teórico 2.** Uso de instrumentos para la medición de velocidad y observaciones en campo

### **Uso del molinete**

Primeramente, se debe de colocar el molinete de forma perpendicular a la sección de aforo y que se encuentre paralelo al escurrimiento, además que esté completamente sumergido. Así, se corrobora que mida la velocidad en el punto de interés y que no incorporen distorsiones en la medición que se efectúa (Uribe, 2019). Si se utilizan molinetes se realiza contando el número de vueltas, se debe de dejar el instrumento al menos de 60 s (Uribe, 2019) o entre 40 a 70 s (Turnipseed & Sauer, 2010). Por otro lado, BIS (2001) recomienda dejar el molinete por 120 s o 150 revoluciones lo primero que ocurra si solo se mide en un solo punto, mientras que si se mide por en más de dos puntos por vertical se puede hacer la lectura a los 30 s.

En el caso de que la velocidad del agua está sujeta a pulsaciones periódicas, se recomienda dejar el molinete al menos de 60 s o por periodos de suficiente duración para cubrir al menos dos periodos de pulsaciones y luego obtener un promedio de las lecturas (BIS, 2001). Si se usan molinetes digitales se debe de realizar una lectura de la velocidad del flujo por 20 segundos. Si se tuviera disponible o que permita la medición, se debe medir la profundidad con una vara graduada (“wading rod”, en inglés) y luego apuntar el dato de la profundidad (Utah State University, 2018).

### **Medición del ancho del canal**

Se debe primero con una cinta métrica extenderla desde el inicio del canal hasta que llegue al final del mismo, se debe de asegurar que se encuentre perpendicular al flujo de agua y que esté firmemente estirada (Utah State University, 2018).

## **Anexo teórico 3.** Curvas de descarga

Si el canal es estable, se necesitan pocas mediciones para la calibración de la curva de descarga, aunque en la mayoría de ríos esto es un comportamiento no esperado, contrario a los canales (Herschy, 2009). Luego de establecer la curva de descarga, se recomienda realizar unos 10 aforos más al año, para registrar posibles cambios (Boyten, 2003).

La curva general de descarga puede cambiar por diversos factores tales como: socavación en un canal inestable, crecimiento de plantas acuáticas, formación de cubierta de hielo, remanso variable en un canal uniforme, remanso variable sumergible en la sección de control, descarga rápidamente cambiante y sobreflujo y encharcamientos en áreas circundantes al flujo del canal (Herschy, 2009).

### ***Incertidumbre en curvas de nivel-caudal***

Martínez & Domínguez (2012), realizaron un estudio en 5 estaciones hidrométricas en Colombia, para conocer la incertidumbre en las curvas de descarga para obtener caudales instantáneos, encontraron que se necesita de al menos 35 aforos. Para encontrar un error menor al 10% del permitido por las estándares hidrométricos en cuanto a los caudales que brinde una curva de descarga, cuando se tengan tirantes de agua pequeños. Al contrario de lo recomendado por la normativa ISO

1100/2, la Organización Meteorológica Mundial (OMM) (Martínez & Domínguez, 2012) y la USGS (Finney,s.f), que recomiendan como mínimo entre 10 a 15 aforos por año.

### Procedimiento matemático para la obtención de la curva de descarga

La curva de descarga se puede expresar mediante la ecuación 55, que es la ecuación de potencia (*power equation*, en inglés) que es ampliamente usada para ajusta datos de caudal y nivel de agua o mediante la ecuación 57, que es una cuadrática más adecuada para propósitos de extrapolación de los datos. Para el uso de las dos ecuaciones se parte de condiciones de flujo permanente, para los pasos siguientes consultar Boyten (2003) y World Meteorological Organization (2010).

$$Q = a(h_w - h_0)^b \quad (56)$$

$$Q = a(h_w - h_0)^2 + c(h_w - h_0) + d \quad (57)$$

Donde:

Q: caudal para un tirante de agua medido ( $m^3/s$ ),  $h_w$ : tirante de agua medido en campo (m),  $h_0$ : tirante de agua a  $Q = 0$  (m) y a,b,c,d: son constantes.

### Anexo teórico 4. Memoria de cálculo consumo de energía.

El sensor “SUTA” se puede alimentar ya sea por medio de una computadora mediante un cable USB, a un tomacorriente mediante un cargador o un batería y que esté alimentada por un panel solar. La ecuación 58 describe la forma de calcular el consumo de energía mientras que en la ecuación 59 el consumo diario. Los valores de  $C_{md}$ ,  $C_{ma}$  y  $C_s$ , se encuentran en el cuadro 2. Se calculó el consumo diario en la ecuación 60 y 61 para un consumo diario de 147,54 mAh. Si la batería tiene una capacidad de almacenaje de 12 000 mAh, se tiene que tiene una capacidad de suministrar energía por 81,33 h o aproximadamente 3 días y 9 horas (ecuación 62).

$$C_{os} \approx C_{md}/60 * t_{md} + C_{ma}/60 * t_{ma} + C_s/60 * 60 \quad (58)$$

Donde:

$C_{os}$ : demanda de corriente ESP32 y sensor (mAh),  $C_{md}$ : demanda de corriente ESP32 modo sueño profundo (mAh),  $C_{ma}$ : demanda de corriente ESP32 modo activo (mAh),  $C_s$ : demanda de corriente sensor US-100 (mAh),  $t_{md}$ : tiempo que se encuentra el ESP32 en modo sueño profundo (min) y  $t_{ma}$ : tiempo que se encuentra el ESP32 en modo sueño profundo (min).

$$D_d = C_{os} * 24 \quad (59)$$

Donde:

$D_d$ : demanda diaria de corriente (mAh),  $C_{os}$ : demanda de corriente ESP32 y sensor (mAh).

$$C_{os} = (0,15/60) * 59 + (240/60) * 1 + (2/60) * 60 = 6,15 \text{ mA} \quad (60)$$

$$D_d = 6,15 * 24 = 147,54 \text{ mA} \quad (61)$$

$$(147.54 \text{ mAh}) / (12\ 000 \text{ mAh}) = 81,33 \text{ h} \quad (62)$$

