

**Universidad de Costa Rica**  
**Facultad de Ingeniería**  
**Escuela de Ingeniería Topográfica**

**Viabilidad topográfica e hidrológica del trasvase de agua desde la  
subcuenca del Río Patria a la cuenca media del Río Virilla**

**Seminario de Graduación**

Para obtener el grado de Licenciatura en Ingeniería Topográfica

Sustentantes

**Jessica Alfaro Morera**

**Luis Andrés Campos Pérez**

**Jacqueline Crawford Warren**

**Adriana Ibarra Vargas**

**Tatiana Oviedo Sánchez**

**Christian Redondo Molina**

Director del Seminario de Graduación

**MSc. Edwin Porras Arce**

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio

Costa Rica

Julio, 2018



Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados  
Centro de Documentación e Información  
UEN Investigación y Desarrollo

## BOLETA DE AUTORIZACIÓN DEL AUTOR PARA PUBLICAR INFORMACIÓN

Yo, Jessica Alfaro Morera

N° Cédula: 2-0647-0011

Dependencia UEN PC - Topografía

Autorizo al Centro de Documentación e Información del Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados para incluir y publicar en el sitio Web del AyA y la Base de Datos del SICEDI la siguiente información:

Título: Viabilidad topográfica e hidrológica del trasvase de  
agua desde la subcuenca del Río Patria a la cuenca media  
del Río Virilla

E-mail: jealfaro@aya.go.cr N° Teléfono: 8881-3763 / 2242-5203

Firma: \_\_\_\_\_

Ciudad de la Investigación, 30 de julio del 2018

Ingeniero  
Juan Antonio Picado Salvatierra  
Director Escuela de Ingeniería Topográfica  
Universidad de Costa Rica

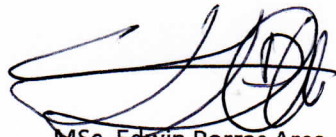
Estimado señor Director:

En mi calidad de Director de la investigación realizada bajo la modalidad de Seminario intitulado **"Viabilidad Topográfica e Hidrológica de Traslase de Agua del Río Patria hacia la Cuenca Media del Río Virilla"**, llevada a cabo en forma conjunta por los y las estudiantes Jessica Alfaro Morera, carné A60176; Luis Andrés Campos Pérez, carné A51177; Jacqueline Crawford Warren, carne 941132; Adriana Ibarra Vargas, carné 931915; Tatiana Oviedo Sánchez, carné A64231 y Christian Redondo Molina, carné 962512, me permito informarle que la misma reúne los requisitos de fondo y forma exigidos por la normativa universitaria.

Dicha investigación es un aporte importantísimo en la búsqueda del agua para consumo humano, actual y futura, con miras a la solución del déficit de agua potable que sufre la población metropolitana de nuestro país.

Los estudiantes han hecho una excelente investigación guardando el rigor científico de nuestra alma mater.

Atentamente



MSc. Edwin Porras Arce  
Director

San José, 03 de agosto del 2018

Ingeniero  
Juan Antonio Picado Salvatierra  
Director Escuela de Ingeniería Topográfica  
Universidad de Costa Rica

Estimado señor Director:

En mi calidad de Asesor del Seminario de Graduación denominado "**Viabilidad Topográfica e Hidrológica de Traspase de Agua del Río Patria hacia la Cuenca Media del Río Virilla**", realizado por los estudiantes Jessica Alfaro Morera, carné A60176; Luis Andrés Campos Pérez, carné A51177; Jacqueline Crawford Warren, carne 941132; Adriana Ibarra Vargas, carné 931915; Tatiana Oviedo Sánchez, carné A64231 y Christian Redondo Molina, carné 962512; me permito informarle que el desarrollo de dicho seminario, reúne los requisitos exigidos por el Reglamento de Trabajos Finales de Graduación.

Dicha investigación, es un aporte muy importante, dentro del análisis de alternativas para la solución del déficit en el abastecimiento de agua potable por medio del Acueducto Metropolitano de AyA.

Dentro de las limitaciones indicadas, los estudiantes han hecho un exhaustivo trabajo, guardando el rigor necesario para este tipo de investigación.

Atentamente,



Ing. Eduardo Lezama Fernández

Asesor

Ciudad de la Investigación, 07 de agosto del 2018

Ingeniero  
Juan Antonio Picado Salvatierra  
Director Escuela de Ingeniería Topográfica  
Universidad de Costa Rica

Estimado señor Director:

En mi calidad de asesor de la investigación realizada bajo la modalidad de Seminario intitulado **"Viabilidad Topográfica e Hidrológica de Traspase de Agua del Río Patria hacia la Cuenca Media del Río Virilla"**, llevada a cabo en forma conjunta por los y las estudiantes Jessica Alfaro Morera, carné A60176; Luis Andrés Campos Pérez, carné A51177; Jacqueline Crawford Warren, carne 941132; Adriana Ibarra Vargas, carné 931915; Tatiana Oviedo Sánchez, carné A64231 y Christian Redondo Molina, carné 962512, me permito informarle que la misma reúne los requisitos de fondo y forma exigidos por la normativa universitaria.

Dicha investigación es un aporte importantísimo en la búsqueda actual y futura con miras a la solución del déficit de agua potable que sufre la población metropolitana de nuestro país.

Los estudiantes han hecho una excelente investigación guardando el rigor científico de nuestra alma mater.

Atentamente



MSc. Rolando Arias Herrera  
Asesor

## **Tribunal Examinador**

MSc. Edwin Porras Arce  
Director del Seminario e Informante

MSc. Rolando Arias Herrera  
Miembro del tribunal

Ing. Eduardo Lezama Fernández  
Miembro del tribunal

Ing. Juan Antonio Picado Salvatierra  
Presidente del tribunal

Dr. Mauricio Varela Sánchez  
Miembro del tribunal

## CARTA DEL FILOLOGO

### **Ficha bibliográfica**

ALFARO MORERA, Jessica; CAMPOS PÉREZ, Luis Andrés; CRAWFORD WARREN, Jacqueline; IBARRA VARGAS, Adriana; OVIEDO SÁNCHEZ, Tatiana y REDONDO MOLINA, Christian. **“Viabilidad topográfica e hidrológica del trasvase de agua de la subcuenca del Río Patria a la cuenca media del Río Virilla”**. Seminario de Licenciatura en Ingeniería Topográfica, Facultad de Ingeniería. Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica.

### **Director de la investigación**

MSc. Edwin Porras Arce

Profesor de la Escuela de Ingeniería Topográfica, Facultad de Ingeniería

Universidad de Costa Rica.

### **Lista de palabras claves**

Acueductos. Trasvases. Cuencas. Aforos. Topografía.

## Derechos de propiedad intelectual

**Fecha:** 2018, julio, 30

Los suscritos, Jessica Alfaro Morera, cédula 2-0647-0011, con número de carné A60176, Luis Andrés Campos Pérez, cédula 2-0615-0923, con número de carné A51177, Jacqueline Crawford Warren, cédula 7-0118-0354, con número de carné 941132, Adriana Ibarra Vargas, cédula 1-0917-0981, con número de carné 931915, Tatiana Oviedo Sánchez, cédula 1-1363-0749, con número de carné A64231 y Christian Redondo Molina, cédula 1-0982-0435, con número de carné 962512, todos estudiantes de la carrera de Licenciatura en Ingeniería Topográfica de la Universidad de Costa Rica, manifiestan que son autores del Seminario de Graduación **Viabilidad topográfica e hidrológica del trasvase de agua de la subcuenca del Río Patria a la cuenca media del Río Virilla**, bajo la Dirección del **MSc. Edwin Porras Arce**, quien en consecuencia tiene derechos compartidos sobre los resultados de esta investigación.

Asimismo, hacemos traspaso de los derechos de utilización del presente trabajo a la Universidad de Costa Rica, para fines académicos: docencia, investigación, acción social y divulgación.

**Nota:** De acuerdo con la Ley de Derechos de Autor y Derechos Conexos N° 6683, Artículo 7 (versión actualizada el 02 de julio de 2001); "no podrá suprimirse el nombre del autor en las publicaciones o reproducciones, ni hacer en ellas interpolaciones, sin una conveniente distinción entre el texto original y las modificaciones o adiciones editoriales". Además, el autor conserva el derecho moral sobre la obra, Artículo 13 de esta ley, por lo que es obligatorio citar la fuente de origen cuando se utilice información contenida en esta obra.

## Pensamiento

***Podrá llorar y cantar el bosque, correr el agua y esconderse la serpiente; morir la flor y descansar el viento, pero si desaparece el hombre nada tiene sentido.” e. porras***

## **Dedicamos este trabajo a**

Dios y a nuestras familias

## **Agradecemos a**

Al profesor Edwin Porras Arce, por el acompañamiento y seguimiento constante en cada una de las etapas de esta investigación, por animarse a ser nuestro mentor, y tener la paciencia mientras se elaboraba el informe.

Al señor Luis Acuña Rodríguez y a los diferentes asistentes de campo por el esfuerzo, dedicación y disponibilidad dada, sin su ayuda este seminario no hubiera sido posible.

A Jonathan Segura Zúñiga por su colaboración en el préstamo de equipo, acompañamiento y ayuda desinteresada en todas las labores de campo.

Finalmente, cada uno de los miembros que elaboró este trabajo, agradece al resto de compañeros del seminario, por continuar hasta el final, a pesar de las dificultades presentadas en el camino.

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

RESUMEN.....	vi
CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN .....	1
1.1    Justificación.....	1
1.1.1 Problema específico .....	1
1.1.2 Importancia.....	1
1.2 Antecedentes .....	2
1.2.1 Antecedentes internacionales .....	2
1.2.2 Antecedentes nacionales .....	2
1.3 Estado de la cuestión .....	8
1.4 Objetivos .....	9
1.4.1 Objetivo general.....	9
1.4.2 Objetivos específicos .....	9
1.5 Delimitación de la investigación.....	9
1.5.1 Alcances de la investigación .....	9
1.5.2 Limitaciones de la investigación.....	10
1.5.3 Proyecciones .....	12
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO.....	12
2.1 Coordenadas y Sistemas de Coordenadas .....	12
2.2 Sistema de coordenadas oficial de Costa Rica.....	13
2.3 Levantamientos topográficos.....	14
2.3.1 Mediciones con estación total .....	14
2.3.2 Mediciones GNSS (Global Navigation Satellite Systems) .....	15
2.4 Hidrología y cuenca.....	15
2.5 Caudal.....	19
2.5.1 Método de estimación .....	20
2.5.2 Método Área-Velocidad.....	21
2.5.3 Método Área-Pendiente .....	22
2.6 Fuentes de agua .....	23

2.7 Traslase de agua.....	24
2.7.1 Túneles.....	24
2.7.2 Tuberías .....	25
2.8 Calidad del agua .....	26
2.8.1 Parámetros físicos .....	26
2.8.2 Parámetros químicos .....	27
2.8.3 Parámetros microbiológicos.....	29
CAPÍTULO 3. MARCO METODOLÓGICO .....	30
3.1 Levantamiento y procesamiento de datos GNSS y GPS .....	30
3.2 Obtención del modelo digital de superficie (MDS) mediante sistemas aéreos no tripulados .....	32
3.2.1 Características técnicas.....	32
3.2.2 Plan de vuelo.....	33
3.2.3 Apoyo terrestre .....	35
3.2.4 Registro fotográfico.....	36
3.2.5 Proceso de datos capturados.....	37
3.3 Determinación de caudal.....	39
3.3.1 Aforos .....	39
3.3.2 Levantamiento hidrográfico.....	40
3.3.3 Aforo por estimación .....	40
3.4 Trazado de rutas de trasvase .....	41
3.4.1 Modelo de Elevación Digital.....	41
3.4.2 Diseño de las rutas .....	44
3.4.3 Variables de las rutas de trasvase .....	45
3.5 Muestreo de calidad del agua.....	47
CAPITULO 4. CARACTERIZACIÓN DE LA SUBCUENCA DEL RÍO PATRIA.....	48
4.1 Características morfológicas .....	48
4.1.1 Parámetros de forma .....	48
4.1.2 Características de relieve.....	48

4.1.3	Parámetros de la red de drenaje .....	51
4.2	Características geológicas y pedológicas .....	52
4.2.1	Condiciones geológicas .....	52
4.2.2	Tipos de suelo .....	53
4.2.3	Geomorfología .....	54
4.3	Uso y cobertura del suelo .....	55
4.3.1	Cobertura del suelo.....	55
4.3.2	Zonas de vida y áreas silvestres protegidas.....	56
4.4	Características climáticas .....	57
4.4.1	Precipitación .....	57
4.4.2	Temperatura .....	60
4.4.3	Evapotranspiración .....	61
4.4.4	Brillo solar .....	62
CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....		63
5.1	Ortomosaico y modelo digital de superficie (MDS) .....	63
5.2	Determinación de caudal promedio .....	65
5.2.1	Aforos por Área-Velocidad .....	65
5.2.2	Método Área-Pendiente .....	68
5.2.3	Análisis de la socavación producida por la tormenta Nate en las secciones del tramo de estudio en el Río Patria.....	69
5.2.4	Método por estimación.....	71
5.3	Rutas de trasvase de agua.....	72
5.3.1	Rutas propuestas.....	72
5.3.2	Valoración de las rutas.....	75
5.4	Porcentaje a abastecer con respecto al déficit de agua existente en la GAM ....	80
5.5	Calidad del agua sitio de aforo del Río Patria.....	84
CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....		86
6.1	Conclusiones.....	86
6.2	Recomendaciones.....	87

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	88
ANEXOS.....	94

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Descripción de la alternativa N°4 del PLAMAGAM.....	5
Figura 2. Sitio de aforo, Río Patria, diciembre 2017. ....	34
Figura 3. Descripción de los recorridos rectangulares.....	35
Figura 4. Detalle punto de control sobre cauce del Río Patria, diciembre 2017.....	36
Figura 5. Alineación y generación de nubes de puntos. ....	37
Figura 6. Ortomosaico a partir de datos de vuelo de dron, Río Patria, diciembre 2017 .....	38
Figura 7. Modelo de Superficie (MDS) a partir de datos de vuelo de dron, Río Patria, diciembre 2017. ....	39
Figura 8. Curva hipsométrica de la subcuenca del Río Patria .....	50
Figura 9. Histograma de frecuencias altimétricas de la subcuenca del Río Patria.....	50
Figura 10. Fotografía de la matriz del suelo en subcuenca del Río Patria.....	53
Figura 11. Estaciones meteorológicas cercanas en la subcuenca del Río Patria .....	59
Figura 12. Gráfico de variación de precipitación mensual de la subcuenca del Río Patria .....	60
Figura 13. Mosaico de imágenes, Río Patria, diciembre 2017 .....	63
Figura 14. Modelo de Superficie (MDS), Río Patria, diciembre 2017. ....	64
Figura 15. Sobreposición entre el Ortomosaico y el MDS, Río Patria, diciembre 2017	64
Figura 16. MDS, formato TIFF, Río Patria, diciembre 2017.....	65
Figura 17. Curvas de descargas en la subcuenca del Río Patria .....	67
Figura 18. Acumulación de lluvia, de los días 4 al 5 de octubre, 2017. Fuente IMN....	69
Figura 19. Producción y Demanda proyectadas.....	81
Figura 20. Variación Temporal del índice Niño entre junio 2016 y marzo 2018 .....	82
Figura 21. Déficit / Superhábit Optimizado.....	83

## ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Estaciones meteorológicas solicitadas. ....	10
Cuadro 2. Parámetros para la determinación de la calidad de las aguas de cuerpos superficiales.....	30
Cuadro 3. Misiones planificadas para la obtención de la fotografía aérea.....	34
Cuadro 4. Variables ponderadas y su puntaje asignado .....	46
Cuadro 5. Parámetros geométricos de la subcuenca del Río Patria .....	48

Cuadro 6. Parámetros de relieve de la subcuenca del Río Patria .....	49
Cuadro 7. Porcentajes de área total y acumulada por rango de elevación de la subcuenca del Río Patria.....	49
Cuadro 8. Longitud de los cauces de la subcuenca del Río Patria, con su respectivo número de orden. ....	51
Cuadro 9. Número de orden y razón de bifurcación de la subcuenca del Río Patria ...	51
Cuadro 10. Aforos de corrientes con molinete .....	65
Cuadro 11. Valores Escala vs Caudal.....	66
Cuadro 12. Datos hidráulicos de la sección de medición .....	67
Cuadro 13. Levantamiento hidrográfico 10/09/2017.....	68
Cuadro 14. Levantamiento hidrográfico 05/12/2017.....	68
Cuadro 15. Datos y resultado de caudal por el método de la estimación .....	72
Cuadro 16. Valoración de las rutas .....	76
Cuadro 17. Variables y puntuación de las rutas .....	79
Cuadro 18. Puntaje total de cada ruta.....	80
Cuadro 19. Resultados de parámetros para determinar calidad del agua .....	84
Cuadro 20. Irregularidad superficial y características.....	95
Cuadro 21. Características de la variación en forma y tamaño de las secciones. ....	97
Cuadro 22. Valor modificante para obstrucciones.....	98
Cuadro 23. Valor modificante para la vegetación.....	98
Cuadro 24. Valor modificante para los meandros. ....	100

## **ANEXOS**

Anexo 1. Memoria de cálculo.....	94
Anexo 2. Estimación del coeficiente hidráulico de rugosidad (Cowan).....	95
Anexo 3. Datos de precipitación de la Estación Meteorológica Cerro Zurquí .....	101
Anexo 4. Mapas de Caracterización de la Subcuenca del Río Patria.....	102
Anexo 5. Datos de aforos del Río Patria .....	115
Anexo 6. Láminas de dibujo del Levantamiento Hidrográfico .....	129
Anexo 7. Láminas de dibujo de las rutas de posibles trasvases de agua .....	133
Anexo 8. Resultados pruebas de laboratorio del Río Patria .....	139

## RESUMEN

La presente investigación busca establecer la viabilidad topográfica e hidrológica de llevar agua del Río Patria hasta un sitio ubicado en la cuenca media del Río Virilla, muy cercano a la Gran Área Metropolitana (GAM), con el fin de abastecer de agua potable a parte de la población de la GAM y, así, disminuir el déficit existente. El presente informe está estructurado de la siguiente manera:

En el capítulo 1, se justifica la investigación, para ello, se define el problema específico, el cual trata sobre el déficit de agua para el consumo humano, originado, principalmente, por el crecimiento poblacional y los cambios climáticos. Esto dificulta, cada vez más, encontrar fuentes de agua de buena calidad. Además, se estudian los antecedentes relacionados, a nivel nacional e internacional. Posteriormente, se plantean los objetivos generales y específicos de la investigación, los cuales buscan determinar de la viabilidad topográfica e hidrológica de un trasvase de agua desde la subcuenca del Río Patria hacia la cuenca media del Río Virilla. Finalmente, se delimita la investigación, mencionando los alcances, las limitaciones y proyecciones.

En el capítulo 2, se presenta el marco teórico, el cual contiene las definiciones básicas y teorías empleadas para la interpretación de los hallazgos y comprensión de la investigación. El capítulo 3 expone la metodología utilizada en la consecución de los datos y diferentes resultados, define los procedimientos de levantamiento y procesamiento de datos GNSS y GPS, la obtención del modelo digital de superficie (mediante sistemas aéreos no tripulados), la determinación del caudal (aforos, levantamiento hidrográfico y estimación), el trazado de rutas de trasvase y el muestreo de la calidad del agua.

En el capítulo 4, se caracteriza la subcuenca del Río Patria. Se buscan establecer las principales características de la zona de estudio tales como: uso y cobertura del suelo, precipitación, morfología, geología, pedología y características climáticas.

En el capítulo 5, se presentan los resultados obtenidos, así como el análisis de los datos derivados de la investigación. En este, se pueden observar datos como el modelo digital de superficie, caudal promedio en el sitio de aforo, rutas de trasiego establecidas, porcentaje a abastecer del déficit de la GAM y la calidad del agua del Río Patria en la zona de estudio. Por último, en el capítulo 6, se exponen las conclusiones finales y recomendaciones para futuras investigaciones que deseen ampliar los resultados obtenidos en este seminario. Además, se presenta una parte de anexos donde se muestran los mapas y planos generados que permiten visualizar, de manera gráfica y georreferenciada, los resultados obtenidos.

# CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1 Justificación

### 1.1.1 Problema específico

El recurso hídrico es vital para la vida del ser humano, es por esta razón que constantemente se buscan fuentes de agua de calidad que permitan el adecuado desarrollo de las poblaciones en sus diferentes ámbitos.

No obstante, el crecimiento poblacional, el desarrollo urbano, la contaminación, el cambio climático, la cultura del mal uso del agua, entre otros factores, han provocado que el déficit de agua aumente de manera crítica con el paso de los años.

Esto se ha visto reflejado en la Gran Área Metropolitana (GAM) de Costa Rica, por lo que en este seminario se investigó la manera óptima de adquirir agua de una fuente de buena calidad, como lo podría ser el agua del Río Patria, para abastecer parte de la población de la GAM.

### 1.1.2 Importancia

El Río Patria se caracteriza por tener agua de calidad, debido a que se encuentra en una zona protegida, su mayoría perteneciente al Parque Nacional Braulio Carrillo, con alta cobertura vegetal, características heterogéneas del relieve y prácticamente nula intervención humana.

Por otra parte, considerando la escasez de fuentes de recurso hídrico cercanas a la GAM y la creciente demanda de agua para consumo humano, el Río Patria representa una opción viable para suplir estas necesidades, dada su cercanía, complementando los sistemas de acueductos actuales.

El presente estudio es un inicio de lo que podría convertirse en un proyecto materializado para alguna de las instituciones que gestionan el agua en Costa Rica, brindando estudios a nivel topográfico e hidrológico, como perfiles, secciones transversales, plantas, pendientes, curvas de nivel, datos de caudales en diferentes tiempos, entre otros. Esto beneficiaría a la GAM, otorgando mayor acceso al agua potable, representando una mejora en la calidad de vida de sus habitantes.

## **1.2 Antecedentes**

### **1.2.1 Antecedentes internacionales**

Históricamente, las poblaciones se han asentado en las cercanías de ríos, manantiales, arroyos, entre otros, y su desarrollo económico ha implicado el agotamiento del recurso hídrico y la búsqueda de nuevas fuentes de agua.

Transportar aguas desde las montañas y construir diferentes sistemas de acueductos son ejemplos repetidos a lo largo del tiempo, con el fin de buscar caudales y llevar sus aguas donde sean necesitadas. Por esto, se ha recurrido a los trasvases llevando el preciado líquido hasta zonas con déficit de este.

En el pasado, se realizaban trasvases a pequeña escala, pero el desarrollo ha permitido que se conviertan en obras de ingeniería de gran importancia, trasladando grandes cantidades de agua a largas distancias, a través de topografía irregular.

Internacionalmente, existen ejemplos relevantes de trasvases. En América, los trasvases más importantes son el Central Valley Project, en los Estados Unidos (EEUU), el trasvase de la bahía de James, en Canadá, el proyecto de trasvase de Olmos, en Perú, y el proyecto de interconexión de la cuenca del San Francisco, en Brasil. En Europa, destacan el trasvase Danubio-Rhin, en Alemania, el trasvase Bajo Ródano-Languedoc, en Francia, el proyecto de desviación del alto del Río Aqueloo, en Grecia, el trasvase Tajo-Segura y el trasvase del Ebro, en España. En Asia, están los trasvases Sur-Norte en China y el Proyecto Nacional de Unión de los Ríos NRLP (por sus siglas en inglés), en la India.

También, en África existen numerosas obras de este tipo, donde destacan el Lesotho Highlands Water Project y los numerosos trasvases, en Sudáfrica. Igualmente, en Australia se encuentra el trasvase Snowy Mountains Scheme. Actualmente, existen cientos de trasvases en proyecto, o en fase de construcción en todo el mundo.

### **1.2.2 Antecedentes nacionales**

El crecimiento de la población y la insuficiencia de los acueductos puso en evidencia las necesidades y problemática existentes referente al agua y alcantarillado en Costa Rica, específicamente en la GAM.

El Servicio Nacional de Acueductos y Alcantarillados (SNAA), creado el 4 de abril de 1961 por la Ley N°2726 y sus posteriores modificaciones, se heredó de un sistema de distribución de agua potable que estaba principalmente en manos de las

municipalidades y que se fue ampliando y unificando mediante diversas obras que marcaron etapas en su desarrollo.

El déficit de agua, sobre todo en los meses de verano, y la existencia de zonas fuera de los límites del acueducto metropolitano a las cuales había que dar servicio, fueron los principales motivos para buscar nuevas fuentes de agua y realizar todas las obras para su conducción, tratamiento y distribución, siendo el Proyecto Orosí, entendido como la tercera etapa del acueducto metropolitano, la mejor alternativa para satisfacer la demanda de agua potable en el área metropolitana.

En los años 80, el Instituto Costarricense de Electricidad (ICE) realizó un estudio para ceder hasta 1.8 m<sup>3</sup>/s de la conducción de la Planta Río Macho para cubrir el faltante de agua en el área metropolitana y en la ciudad de Cartago. No obstante, esta medida hubiera reducido la disponibilidad de agua para la generación de energía, por lo que se necesitaba adicionar agua de fuentes cercanas para aliviar dicha situación.

Es entonces cuando surge la idea de tomar las aguas drenadas por la cuenca superior del Río Pejibaye y llevarlas hasta el Río Grande de Orosí por medio de la construcción de un túnel trasvase de aproximadamente 2.4 km, el cual se conectaría con el túnel de Tapantí, además de dos tomas de agua para captar escurrimientos de los Ríos Villegas y Porras que se conectarían al mismo túnel, con el fin de aprovechar las aguas en las Plantas Río Macho y Cachí.

También, como parte del Proyecto Orosí, se realizó un túnel en el Cerro de La Carpintera. Este se construyó a través del cerro, con sección en forma de herradura, con una longitud de 986 m.

Luego de la entrada en operación del Acueducto Orosí en el año 1987, el ya Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados, comúnmente llamado AyA contrató a la firma consultora Tahal Consulting Engineers LTD., para el desarrollo del Plan Maestro de Abastecimiento de Agua Potable para el Gran Área Metropolitana (PLAMAGAM), el cual tuvo como objetivo el establecimiento de propuestas de corto y largo plazo para el desarrollo del Acueducto Metropolitano.

En este estudio se analizaron los recursos hídricos potencialmente utilizables del país y se establecieron propuestas para el desarrollo de nuevas fuentes de abastecimiento de agua, las cuales se dividieron en dos grupos: 1) Aguas Superficiales y 2) Aguas Subterráneas. Las siete alternativas propuestas por la firma Tahal Consulting Engineers LTD. fueron:

- 1- Campo de pozos Norte y Potrerillos
- 2- Orosí II
- 3- Manantial Prendas
- 4- Río Hondura-Cascajal y Patria
- 5- Río Poas-Itiquís
- 6- Río Sarapiquí, San Rafael y La Paz
- 7- Río Pirrís

La alternativa N°4 constituye un antecedente directo a esta investigación, pues en ella se contempló captar de forma directa los Ríos Hondura-Cascajal y Patria, de manera que las distancias de conducción hasta el acueducto metropolitano fueran razonables y la construcción de las captaciones presentara caudales apropiados. Del estudio se obtuvieron los siguientes resultados

- Coordenadas y cotas de captación en los Ríos Hondura-Cascajal, longitud 539600 m, latitud 228500 m y cota 950 msnm.
- Coordenadas y cotas de captación en el Río Patria, longitud 537000 m, latitud 230900 m y cota 900 msnm.
- Ambas captaciones se encuentran en la vertiente del Atlántico, por lo que se deben instalar sistemas de bombeo, debido a que la captación directa de estos ríos obedece al criterio de que, por ser cuencas altas y pendientes de cauces pronunciadas, dificulta la construcción de embalses, lo que conlleva a una relación “volumen de presa/volumen embalsado” muy alta, que no tendría justificación económica.
- El estudio hidrogeológico determinó que los caudales mínimos para un período de retorno de 1:25 años es aproximadamente 0.60 m<sup>3</sup>/s para cada toma.
- En períodos de estiaje se complementarían las captaciones de estos ríos con un campo de pozos adicional.
- La calidad de agua de estos ríos es muy buena debido a que sus cuencas se encuentran protegidas por el Parque Nacional Braulio Carrillo.
- El estudio también determinó que se obtenían caudales óptimos captando únicamente los Ríos Hondura y Cascajal.
- En cuanto a la hidrología en el momento del estudio, año 1990, no había registros de caudal en ninguno de los dos sitios de toma, por lo que se utilizó la estación Cariblanco del ICE para estimarlos por medio de correlación. Esta estación se encuentra sobre el Río Sarapiquí que se ubica también en la Vertiente Caribe. Las condiciones de esta cuenca eran las más representativas.

- La topografía de las cuencas es irregular y con pendientes de 15 % o más.
- Las obras de captación deben resistir grandes crecidas que pueden ocurrir a pesar de que las cuencas en los sitios de toma son pequeñas.

Por otra parte, el estudio considera conducir las aguas de los Ríos Hondura-Cascajal y Patria mediante sistemas de bombeo y tuberías hasta un sitio de reunión sobre la subcuenca del Río Hondura. También para la conducción del Río Patria se consideraría un túnel de aproximadamente 1150 m de longitud, con orientación NO-SE, a una elevación de 1100 msnm en la subcuenca del Río Patria cuyo inicio estaría en las coordenadas longitud 538000 m y latitud 229200 m.

El tanque de reunión (estación de rebombeo) se ubicaría en el sitio Finca Isabelita y de ahí las aguas se conducirían siguiendo el trazo de mínima pendiente sobre la subcuenca del Río Cascajal hasta la cota de aproximadamente 1490 msnm para ingresar a la Vertiente Pacífica por las Fincas Esperanza y Porvenir, desde ahí el agua se conduciría por gravedad siguiendo la antigua carretera “Braulio Carrillo” hasta el sitio de la planta de tratamiento a una elevación 1470 msnm cerca de San Pedro de Coronado. Una vez tratada el agua, se almacenaría en un tanque en San Isidro de Coronado. Lo descrito anteriormente se puede observar en la siguiente figura.

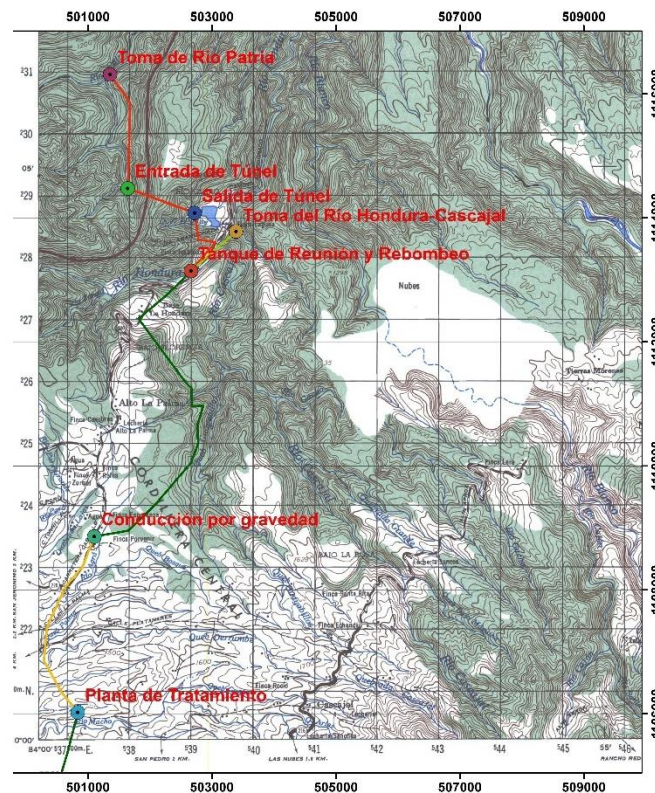


Figura 1. Descripción de la alternativa N°4 del PLAMAGAM.

Es importante destacar que el estudio de la firma Tahal Consulting Engineers LTD. al comparar las siete alternativas y considerar aspectos económicos, de caudales, ambientales, facilidad de operación y mantenimiento, entre otros, muestra la alternativa N°4 Río Hondura-Cascajal y Patria no viable a desarrollar en un futuro cercano, por la inversión económica que involucra en comparación con las demás propuestas.

Posterior al PLAMAGAM, se origina el proyecto Quinta Etapa de Abastecimiento al Acueducto Metropolitano, y para realizar el estudio de factibilidad de este proyecto se suscribió en noviembre del 2012 un contrato interinstitucional de prestación de servicios entre el ICE y el AyA.

Se debe indicar que este proyecto de Quinta Etapa de Abastecimiento al Acueducto Metropolitano, aún no ha iniciado con su fase de ejecución, sin embargo, es un referente por su importancia en cuanto a las obras que contempla, en especial, túneles de conducción para agua potable.

La conducción de la Quinta Etapa de Abastecimiento del Acueducto Metropolitano discurre a lo largo de 23.2 km, desde el Embalse el Llano en Orosí de Cartago y llegando a la nueva planta potabilizadora ubicada en la parte alta de Patarrá, por el camino a Coris, siendo importante indicar que se conducirá un caudal de 2.5 m<sup>3</sup>/s.

Primeramente, se conduce a través de un túnel denominado Túnel El Llano con una longitud de 4.63 km, este inicia justo aguas abajo del desarenador que estará ubicado al noroeste del embalse el Llano, del Centro de Producción Río Macho del ICE, y finaliza en una propiedad privada, Finca Vivero Forestal El Muñeco S.A.

A partir del portal de salida del Túnel El Llano, la conducción desciende mediante tubería enterrada sobre servidumbre y camino público hasta llegar al cruce del Río Navarro, donde será mediante un puente-tubo, para luego continuar mediante tubería enterrada sobre camino público y servidumbre hasta llegar al portal de entrada del Túnel Tejar. La longitud de la tubería de conducción entre el portal de salida del Túnel El Llano y el portal de entrada del Túnel Tejar es de 3.58 km.

El Túnel Tejar tiene una longitud de 3.67 km y su portal de salida se encuentra en las cercanías de la comunidad de Guatuso de El Tejar de El Guarco. A partir de ahí, las aguas se conducen por tubería enterrada sobre servidumbre y camino público pasando por localidades de Coris y subiendo hasta llegar al Alto Lajas, para una longitud de tubería de 11.3 km. En Alto Lajas se conduce el agua por un pequeño túnel llamado Túnel Lajas con una longitud de 210 m, luego se conduce a través de tubería por servidumbre una longitud de 526.07 m, hasta llegar a una planta potabilizadora.

Otro antecedente es el Proyecto Trasvase al Río Liberia, que comprende la sección del trasvase del Río Negro a la quebrada Zopilote y el mejoramiento de canal húmedo desde la quebrada Rancho Grande hasta el Río Liberia. El objetivo principal del trasvase al Río Liberia es mejorar el abastecimiento de agua potable a la ciudad de Liberia y facilitar a algunas fincas cercanas la posibilidad de abreviar el ganado.

Este proyecto contempla utilizar aguas del Río Negro mediante la construcción de una presa de derivación, para luego trasvasar y conducir el agua por medio de un canal de tierra hacia el cauce de la quebrada Zopilote, la cual es afluente del Río Negro, con el fin de reforzar y aumentar el caudal del Río Liberia, no sólo para derivar mayor cantidad de caudal al sistema del Acueducto Liberia, sino también, para que dicho cauce durante la época de estiaje posea un caudal suficiente.

También, existe la aplicación de trasvase de aguas en el proyecto denominado Distrito de Riego Arenal Tempisque (DRAT), el cual se creó el 16 de marzo de 1984 mediante el Decreto Ejecutivo N°15321-MAG con potestad para administrar y controlar las aguas generadas en el complejo hidroeléctrico ARCOSA (Arenal-Corobicí-Sandillal), en función de su aprovechamiento para irrigación en las partes bajas de los cantones de Cañas, Bagaces, Abangares, Liberia y Carrillo, fomentando el desarrollo agropecuario de la provincia de Guanacaste. Las aguas del Arenal, que drenan naturalmente hacia la vertiente Caribe son trasvasadas a la vertiente del Pacífico para generar energía eléctrica y para el riego.

La infraestructura básica del proyecto DRAT comprende la presa derivadora Miguel Dengo, el canal del Sur con 42 km de longitud y una capacidad de conducción de 30 m<sup>3</sup>/s de agua, el canal del oeste con 85 km de extensión y una capacidad de 55 m<sup>3</sup>/s de agua, además de 1200 km de canales secundarios y de distribución de drenaje, 1040 km de caminos bordeando en su mayoría los canales y drenajes, y más de 2000 obras y estructuras accesorias para llevar el agua a cada finca.

Por otra parte, el proyecto más reciente de un túnel trasvase en Costa Rica es el construido para el Proyecto de Mejoramiento Ambiental del Área Metropolitana de San José (PMAAMSJ) del Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados. En octubre del 2006, mediante la Ley N°8559, se aprobó en la Asamblea Legislativa el contrato de préstamo con el Banco de Japón para la Cooperación Internacional (JBIC), para atender el problema de saneamiento en el Área Metropolitana de San José (AMSJ).

El objetivo del proyecto es mejorar la calidad del agua de los ríos y mantos acuíferos del AMSJ, causada por la descarga directa y sin tratamiento de las aguas residuales, mediante la rehabilitación y expansión del sistema de recolección y la construcción de una planta de tratamiento primaria con tratamiento completo de lodos, para contribuir de esta manera a mejorar el ambiente y las condiciones de salud dentro del área.

Las aguas residuales generadas en el área metropolitana de San José son recolectadas actualmente por 4 colectores principales: Colector Rivera (22.7 km), Colector Torres (21.1 km), Colector María Aguilar (25.4 km) y Colector Tiribí (15.4 km), los cuales tienen una longitud total 84.6 km. Como parte del PMAAMSJ, se construyó un túnel trasvase de 1800 m de longitud (cuya ruta prácticamente coincide con la autopista de circunvalación en la zona entre los Hatillos y Pavas) que lleva las aguas servidas de los colectores Tiribí y María Aguilar, localizados al sur del área metropolitana, hacia la cuenca del Torres, desde donde se conducen por medio de un emisario junto con las aguas provenientes de los colectores Rivera y Torres a la Planta de Tratamiento “Los Tajos”.

Pese a la gran importancia de los trasvases, estos siempre han sido cuestionados dada su complejidad como obras de ingeniería, y todos los factores financieros, ambientales y sociales que ellos involucran.

### **1.3 Estado de la cuestión**

Al momento de la elaboración de esta investigación, no existe ningún estudio reciente relacionado con los objetivos a desarrollar en este trabajo. Toda la bibliografía encontrada corresponde a investigaciones con distintos enfoques.

En 1987, el AyA realizó un estudio para trasvasar agua de los Ríos Patria, Hondura y Cascajal a la GAM, por medio de bombeo (ya citado). Sin embargo, esto permaneció como una propuesta que en la actualidad no se le ha dado seguimiento.

En 2016, se inició el proyecto de cooperación técnica: “Seguridad y sostenibilidad hídrica en el Valle Central de Costa Rica”, una iniciativa que reúne a la Universidad Nacional (UNA), la Fundación para el Desarrollo de la Cordillera Volcánica Central (FUNDECOR) y la Empresa de Servicios Públicos de Heredia (ESPH). Este proyecto se enmarca en el establecimiento de una red de monitoreo hidrometeorológico y de muestreo automático en la zona intermontañosa norte del sistema de acuíferos Barva y Colima que permitirá determinar componentes hidrológicos.

En las giras realizadas durante esta investigación a la parte norte de la subcuenca del Río Patria, se encontraron estaciones hidrometeorológicas cerca del Monte de la Cruz y en el Refugio Cerro Dantas, así como una estación de nivel en el cauce de la Quebrada Grande, que forman parte del proyecto “Seguridad y sostenibilidad hídrica en el Valle Central de Costa Rica”. Los datos de estas estaciones fueron solicitados, pero no están disponibles al público, ya que aún no han sido oficializados, debido a la etapa en la que se encuentra el proyecto.

## **1.4 Objetivos**

### **1.4.1 Objetivo general**

- a. Determinar la viabilidad topográfica e hidrológica de un trasvase de agua desde la subcuenca del Río Patria hacia la cuenca media del Río Virilla.
- b. Establecer la calidad del agua del Río Patria en el sitio de toma de agua.

### **1.4.2 Objetivos específicos**

- Determinar coordenadas tridimensionales de posibles sitios de toma de agua.
- Establecer el caudal en el sitio de toma de agua.
- Caracterizar la subcuenca del Río Patria.
- Definir diferentes rutas superficiales y subsuperficiales de trasiego de agua.
- Establecer el porcentaje a abastecer con respecto al déficit de agua existente en la GAM.
- Caracterizar el agua del Río Patria en el sitio de aforos.

## **1.5 Delimitación de la investigación**

### **1.5.1 Alcances de la investigación**

Esta investigación se enfoca en la viabilidad topográfica e hidrológica para trasvasar agua del Río Patria a la GAM, por gravedad.

El estudio contempla la medición del caudal en el sitio de aforo a una elevación de 1189.816 m, y propone dos sitios de toma en el Río Patria, uno a una elevación de 1260 msnm, y otro a una elevación de 1515 msnm.

Por ser una investigación de tipo exploratoria, con el fin de establecer la viabilidad física de realizar el trasvase por gravedad de agua del Río Patria hacia la GAM, esta investigación estudia las condiciones topográficas aptas para conducir el agua a través

de una tubería o por medio de un túnel, ambos trabajando a superficie libre. Sin excluir que sea mediante una combinación de ambas formas de conducción.

El estudio topográfico establece las pendientes que proporcionen la movilidad del fluido por gravedad, desde las tomas de agua en el río citado hasta los sitios de almacenamiento, cercanos a la ciudad de San José, en la cuenca del Río Virilla. También incluye la ubicación de estos puntos, mediante el sistema de coordenadas horizontales para Costa Rica, proyección cartográfica CRTM05, así como la determinación de elevaciones a partir del modelo geoidal EGM08.

La investigación establece cuánto porcentaje del déficit de agua potable de la demanda poblacional de la GAM se puede abastecer. Esto de acuerdo con el faltante de agua establecido en el estudio Proyección de Oferta y Demanda del Acueducto Metropolitano AyA con la integración de la Ampliación del Acueducto Metropolitano-Sistema Patarrá (Orosí II), elaborado por el ingeniero Isidro Solís, funcionario de ese instituto, en el año 2016.

Esta investigación excluye aspectos ambientales, geológicos, legales y de diseño civil que implica la conceptualización de un proyecto de trasvase de agua.

### 1.5.2 Limitaciones de la investigación

Las mediciones de campo se iniciaron una vez aprobados los permisos de ingreso por el Sistema Nacional de Áreas de Conservación para la Cordillera Volcánica Central, los cuales tardaron varios meses en ser otorgados, debido a la tramitología establecida. El período de medición de caudales se redujo a menos de un año, lo que implicó que no se lograra obtener un registro amplio de variaciones de caudal con respecto al tiempo.

Cerca del área de estudio existen varias estaciones meteorológicas pertenecientes al Instituto Costarricense de Electricidad (ICE) y al Sistema de Nacional de Aguas Subterráneas, Riego y Avenamiento (SENARA), en donde la solicitud y entrega de información, conllevaron tramitología y tiempo más allá de lo previsto. Las estaciones de las que se solicitó información, son las siguientes:

Cuadro 1. Estaciones meteorológicas solicitadas.

Número	Nombre	Norte (m)	Este (m)	Altitud (msnm)	Sistema de coordenadas	Institución
69505	Vara Blanca	1125351	482664	1773	CRTM-05	ICE
69600	Cerro Zurquí	1113344	499839	1516	CRTM-05	ICE
69604	La Montura	1118140	502920	1146	CRTM-05	ICE
69636	Finca Gavilanes	1107279	519316	2111	CRTM-05	ICE
69638	Chindama	1118862	520317	729	CRTM-05	ICE
84118	Barva	1111698	488367	1585	CRTM-05	ICE

Número	Nombre	Norte (m)	Este (m)	Altitud (msnm)	Sistema de coordenadas	Institución
84122	San Luis de Santo Domingo	1107388	497080	1341	CRTM-05	ICE
84124	San Pedro de Coronado	1104920	502774	1626	CRTM-05	ICE
84054	Monte de la Cruz	1111963	490275	1700	CRTM-05	SENARA
84060	Los Cartagos	1121267	482585	2050	CRTM-05	SENARA

De todas las estaciones del cuadro anterior, la única utilizada para caracterizar la precipitación en la subcuenca estudiada, debido a su ubicación, elevación y similitud con las características de la zona, fue la estación Cerro Zurquí.

Además, existe información de estaciones meteorológicas de la Empresa de Servicios Públicos de Heredia (ESPH) de las cuales la información solicitada no fue otorgada, dado que corresponden a estudios en desarrollo no oficializados, ya que forman parte del proyecto “Seguridad y sostenibilidad hídrica en el Valle Central de Costa Rica” citado anteriormente.

Cabe destacar que el Seminario de Graduación establece un periodo máximo de tres ciclos, de acuerdo con el Reglamento de Trabajos Finales de Graduación de la Universidad de Costa Rica, situación que no permitió continuar con un plazo más extenso en la obtención de datos.

La investigación fue financiada en su totalidad por los participantes de este seminario, suministrando los equipos, transporte y personal necesarios para realizar todas las mediciones y giras técnicas requeridas. Esta circunstancia limitó el presupuesto para el desarrollo del proyecto.

Las condiciones topográficas y el tiempo atmosférico de la zona en estudio fueron factores determinantes para el acceso y la programación de las giras al sitio de medición. La topografía del terreno con laderas y pendientes muy pronunciadas, sin rutas de acceso, cruces sobre quebradas, densa vegetación, largas jornadas de desplazamiento, así como el peso de los equipos de medición utilizados, dificultaron el ingreso al punto de aforo y a otros sectores de interés a lo largo del cauce del Río Patria.

Asociadas a las condiciones topográficas descritas, las variaciones del tiempo en esta zona de bosque primario y con altas precipitaciones anuales, incluyendo la Tormenta Tropical Nate (en octubre de 2017) provocó que el terreno fuese muy inestable y lodoso, complicando aún más el ingreso y provocando lesiones en una participante.

### **1.5.3 Proyecciones**

La investigación sirve de base para el desarrollo de un proyecto de acueducto dirigido a la GAM, en el cual sería necesario incluir aspectos geológicos, ambientales, legales y económicos.

Los resultados pueden ser utilizados por municipalidades e instituciones interesadas en desarrollar o ampliar sus sistemas de distribución del recurso hídrico.

También puede servir a otros investigadores públicos y privados (universidades, organizaciones no gubernamentales, empresas...) de diversas especialidades, en la prosecución de sus propias investigaciones.

Cualquier estudiante puede proseguir esta investigación exploratoria profundizando en los aspectos aquí abordados y en los que se quedan sin investigación.

## **CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO**

Para el análisis de los datos que se generaron, es preciso establecer los conceptos, fundamentos y teorías científicas que se utilizaron en esta investigación, constituyendo así el presente marco teórico.

### **2.1 Coordenadas y Sistemas de Coordenadas**

Sistema de coordenadas planas: Un sistema de coordenadas planas proporciona una base común de referencia (plano datum) para el control horizontal de todos los levantamientos de una extensa zona, de la misma manera que el geode proporciona un control a nivel vertical. Este sistema elimina la necesidad de efectuar levantamientos individuales, basados en coordenadas diferentes fijadas sin relación alguna con las usadas en levantamientos adyacentes. Se dispone de coordenadas planas estatales para todos los puntos de control en el sistema nacional de referencia espacial, y también para muchos otros puntos de control. Se usan ampliamente como los puntos de referencia para iniciar levantamientos de todo tipo, incluidos los usados en proyectos de construcción de autopistas, catastrales y la cartografía fotogramétrica (Wolf & Ghilani, 2008).

Para convertir las posiciones geodésicas de una parte de la superficie terrestre a coordenadas rectangulares planas, los puntos se proyectan matemáticamente desde el elipsoide hasta una superficie desarrollable imaginaria (una superficie que pueda desarrollarse conceptualmente o “desarrollarse y extenderse” sin que haya distorsión

de la forma o el tamaño). Puede superponerse una cuadrícula rectangular sobre la superficie plana desarrollada, y quedar especificadas las posiciones de puntos respecto a los ejes X y Y de la cuadrícula. Una cuadrícula plana desarrollada usando ese proceso matemático se llama *proyección cartográfica* (Wolf & Ghilani, 2008).

Actualmente, dos de las proyecciones cartográficas comúnmente usadas son la Proyección Cónica Conforme, de Lambert, y la Proyección Transversal, de Mercator. Para Costa Rica, la proyección es CRTM05, con el datum es CR05.

El geoide y el elipsoide: El geoide es una superficie gravitatoria equipotencial localizada aproximadamente al nivel medio del mar, que es perpendicular en todo punto a la dirección de la gravedad. Debido a las variaciones en la distribución de la masa de la Tierra y a la rotación de la Tierra, el geoide tiene una forma irregular. Por otro lado, el elipsoide es una superficie matemática obtenida al hacer girar una elipse alrededor del eje polar de la Tierra. Las dimensiones de la elipse se seleccionan de modo de se obtenga un buen ajuste del elipsoide con el geoide para un área grande y se basan en levantamientos hechos en el área (Wolf & Ghilani, 2008). Para esta investigación, el geoide utilizado es el EGM08 y el elipsoide es WGS84.

Datum: se define como el punto tangente al elipsoide y al geoide donde ambos son coincidentes (Wolf & Ghilani, 2008).

## **2.2 Sistema de coordenadas oficial de Costa Rica**

De conformidad al artículo 11, del Decreto Ejecutivo 33797-MJ-MOPT, de Oficialización de la Red Geodésica Nacional de Referencia Horizontal CR05 y de la Proyección Transversal de Mercator para Costa Rica CRTM05, del 30 de marzo del 2007, publicado en el Diario Oficial La Gaceta N°108 del 06 de junio del 2007, se establece que dicha red y proyección constituirán el único sistema oficial de coordenadas para la República de Costa Rica.

El datum horizontal oficial, CR05, está enlazado al Marco Internacional de Referencia Terrestre (ITRF2000) del Servicio Internacional de Rotación de la Tierra (IERS) para la época de medición 2005.83, asociado al elipsoide del Sistema Geodésico Mundial (WGS84).

Este datum está materializado a través de la denominada Red Geodésica Nacional de Referencia Horizontal CR05 de Primer Orden y su densificación al Segundo Orden, que consiste en un conjunto de vértices geodésicos situados sobre el terreno, dentro del ámbito del territorio nacional, establecidos físicamente mediante monumentos

permanentes, sobre los cuales se han hecho medidas directas mediante Sistemas de Posicionamiento Global, estableciendo su interconexión y la determinación de su posición, y que permitirá referenciar todos los levantamientos y actividades cartográficas y geodésicas que se efectúen en el Territorio Nacional.

De la misma forma, para la proyección CRTM05 se tienen los siguientes parámetros:

- Meridiano Central= 84° Oeste
- Paralelo Central= 0°
- Coordenada Norte de origen= 0 m
- Coordenada Este de origen= 500000 m
- Factor de escala= 0,9999

### **2.3 Levantamientos topográficos**

Los levantamientos topográficos se clasifican en dos categorías generales: geodésicos y planos. Los levantamientos geodésicos se dan en grandes extensiones que hacen necesario considerar la curvatura de la Tierra (Gámez Morales, 2015).

Los levantamientos geodésicos se efectúan normalmente con mayor precisión que para el caso de los levantamientos planos. En la actualidad, es más común realizar cálculos geodésicos en un sistema tridimensional con coordenadas cartesianas con centro en la Tierra (Wolf & Ghilani, 2008).

Los levantamientos topográficos son aquellos que por abarcar superficies reducidas pueden hacerse despreciando la curvatura terrestre, sin error apreciable. Los mismos comprenden dos etapas, una es la etapa de campo, la cual, consiste en la toma de datos, tales como ángulos, distancias, etc., y la segunda etapa, consiste en el trabajo de gabinete, es decir, corresponde al cálculo y dibujo de lo levantado en el campo (Gámez Morales, 2015).

#### **2.3.1 Mediciones con estación total**

Las estaciones totales o taquímetros electrónicos son la combinación de un Instrumento Electrónico de Medición de Distancias (IEMD), un Teodolito Digital Electrónico (TDE) con un Procesador Electrónico de Información (PEI) y computadora, en un solo instrumento (Alcántara García, 2007).

Estos dispositivos miden automáticamente ángulos horizontales y verticales, así como distancias y transmiten los resultados en tiempo real a una computadora incorporada. Si el instrumento está orientado en dirección de la estación ocupada, se ingresan al

sistema y pueden obtenerse inmediatamente las coordenadas de cualquier punto visado (Wolf & Ghilani, 2008).

### **2.3.2 Mediciones GNSS (Global Navigation Satellite Systems)**

El concepto de GNSS (Global Navigation Satellite Systems) es el término estándar genérico que engloba a los Sistemas de Navegación por satélite que proporcionan un posicionamiento geoespacial con cobertura global, tanto de forma autónoma, como con sistemas de aumentación. GPS y GLONASS son los únicos sistemas GNSS plenamente operando en 2015 a los que el sistema BeiDou Chino se ha sumado, y en breve se sumará GALILEO y Quasi-Zenith (QZSS) (Berné Valero, Anquela Julián, & Garrido Villén, 2014).

Cada satélite tiene varios relojes atómicos y genera a partir de la frecuencia fundamental varias ondas portadoras, y códigos modulados pseudoaleatorios, que emiten a la Tierra. Los receptores de suelo reciben estas señales y luego calculan sus posiciones. La precisión que se puede alcanzar en geodesia es del orden de unos pocos milímetros. (Berné Valero, Anquela Julián, & Garrido Villén, 2014)

El GNSS está integrado por tres segmentos o componentes de un sistema, que a continuación se mencionan, basándose en información de la National Aeronautics and Space Administration (NASA) (2017):

- a) Segmento espacial.
- b) Segmento de control: Posición de las estaciones de seguimiento y la estación principal de control.
- c) Segmento usuario: Lo integran los receptores GPS que registran la señal emitida por los satélites para el cálculo de su posición tomando como base la velocidad de la luz y el tiempo de viaje de la señal, así se obtienen las pseudodistancias entre cada satélite y el receptor en un tiempo determinado, observando al menos cuatro satélites en tiempo común; el receptor calcula las coordenadas X, Y, Z y el tiempo.

## **2.4 Hidrología y cuenca**

Una cuenca es una depresión en la superficie de la tierra, un valle rodeado de alturas. La cuenca hidrográfica tiene un sentido más amplio, es una parte de la superficie terrestre cuyas aguas fluyen hacia un mismo río o lago (Gamez Morales, 2009).

En su libro *Hidrología*, el Ingeniero Villón Béjar define cuenca hidrográfica al área de terreno donde todas las aguas caídas por precipitación se unen para formar un solo

curso de agua, además considera que esta zona está formada por los puntos de mayor nivel topográfico y cruza las corrientes en los puntos de salida. También, hace una clasificación de cuenca grande y pequeña. La cuenca grande es aquella en la que predominan las características fisiográficas (pendiente, elevación, área, cauce), además, para fines prácticos se considera grande, cuando el área es mayor a 250 km<sup>2</sup>. Por su parte, la cuenca pequeña es aquella que responde a las lluvias de fuerte intensidad y pequeña duración, y en la cual las características físicas (tipo de suelo y vegetación) son más importantes que las del cauce. Se considera cuenca pequeña aquella cuya área varíe desde unas pocas hectáreas hasta un límite que, para propósitos prácticos, se considera 250 km<sup>2</sup>.

Una cuenca hidrográfica trabaja para su delimitación con una línea imaginaria que une los puntos de mayor altura (la línea de Cumbres, también llamada línea divisoria de aguas), entre dos laderas adyacentes pero opuestas, implicando una demarcación de las superficies de drenaje superficial desde su punto de emisión hasta un punto de salida en común.

La cuenca hidrográfica está relacionada con características morfológicas, entre ellas se debe describir, los parámetros de forma, de relieve y los parámetros de la red de drenaje de la cuenca a estudiar. A continuación, se da una breve explicación de conceptos que permiten caracterizar la cuenca de manera física.

Superficie de la cuenca: Se refiere al área proyectada en un plano horizontal, es de forma muy irregular; se obtiene después de delimitar la cuenca. Se expresa en hectáreas si la cuenca es pequeña o en kilómetros cuadrados si es mayor, generalmente se trabaja con una sola cifra decimal.

Perímetro de una cuenca: El Perímetro (P) refiere a la longitud del polígono que define los límites de la cuenca.

Cauce principal o río principal: se caracteriza por ser el que tiene mayor longitud, es decir, tiene un curso que es la distancia desde donde nace hasta su desembocadura.

Existen algunos términos que hacen referencia a diferentes conceptos, cuando se menciona el río principal o cauce, dichos términos, son definidos a continuación según el libro Hidrología, del Ingeniero Villón Béjar.

- Margen derecha: Mirando río abajo, la margen que se encuentra a la derecha.
- Margen izquierda: Mirando río abajo, la margen que se encuentra a la izquierda.
- Aguas abajo: Aguas que se encuentran en la parte baja del río.

- Aguas arriba: Aguas que se encuentran en la parte arriba del río.
- Afluentes: Son los ríos secundarios que desembocan en el río principal. Cada afluente tiene su cuenca, denominada subcuenca.

Curva hipsométrica: Es la curva que, puesta en coordenadas rectangulares, representa la relación entre la altitud, y la superficie de la cuenca que queda sobre esa altitud, en términos generales, la curva hipsométrica indica el porcentaje de área de la cuenca o bien la superficie de la cuenca que existe por encima de cierta cota determinada.

Histograma de frecuencias altimétricas: Indica el porcentaje de la cuenca comprendido entre dos elevaciones determinadas (Villón Béjar, 2004).

Índice de Gravelius o coeficiente de compacidad: Es la relación que existe entre el perímetro de la cuenca y el perímetro de una circunferencia de área igual a la de la cuenca (Nanía & Gómez Valentín, 2006).

$$I_G = \frac{1}{2\sqrt{\pi}} * \frac{P}{\sqrt{A}} \quad (1)$$

Siendo  $P$  el perímetro de la cuenca (km) y  $A$  el área de la cuenca (km<sup>2</sup>). Cuanto más irregular sea la cuenca, mayor será su coeficiente de compacidad. Una cuenca circular tendrá un coeficiente de compacidad mínimo, igual a 1. El índice de compacidad trata de expresar la influencia del perímetro y el área de una cuenca en la escorrentía.

Factor de forma: Es la relación entre el ancho medio y la longitud del cauce principal de la cuenca. El ancho medio se obtiene dividiendo el área de la cuenca por la longitud del cauce principal. Una cuenca con un factor de forma bajo está menos sujeta a crecidas que una de la misma área y mayor factor de forma. (Villón Béjar, 2004)

$$k_f = \frac{B}{L_c} = \frac{A}{L_c^2} \quad (2)$$

Siendo  $B$  el ancho medio de la cuenca (km),  $A$  el área de la cuenca (km<sup>2</sup>) y  $L$  la longitud del cauce principal de la cuenca (km). Una cuenca con un factor de forma bajo está menos sujeta a crecidas que una de la misma área y mayor factor de forma.

Red de drenaje: Se puede definir como la trayectoria, disposición o arreglo de los cauces y lechos por donde de manera superficial y aparente corre el agua excedente, producto de la precipitación hacia un depósito natural o artificial. La red de drenaje manifiesta la eficiencia del sistema de drenaje en el escurrimiento resultante, es decir la rapidez con que se desaloja la cantidad de agua que recibe. (Gamez Morales, 2009)

Número de orden de los cauces: El número de orden expresa una clasificación del grado de ramificación de la red de drenaje. Esta jerarquía fue desarrollada por Horton en 1945 y sistematizado por Strahler en 1957. El procedimiento consiste en asignar a todos los cauces sin afluente el orden de uno, si el cauce se forma de la unión de dos cauces de diferente orden se mantiene el mayor de los órdenes de los afluentes y, por último, si el cauce es conformado por dos cauces de igual número de orden, el cauce es un número de orden mayor de los afluentes. (Villón Béjar, 2004)

Relacionado con el número de orden de los cauces, Horton encontró la ley del número de orden, la cual refiere una proporción geométrica entre el número de cauces ( $N_i$ ) de un orden y el número de orden asociado ( $i$ ). Para describir la relación indicada se emplea la razón de bifurcación, siguiendo las expresiones, donde  $k$  es el número de la cuenca:

$$N_i = r_b^{k-i} \quad (3)$$

$$r_b = \frac{N_i}{N_{i+1}} \quad (4)$$

Pendiente de la cuenca: es un parámetro importante en el estudio de la cuenca tiene relación con la infiltración, la escorrentía superficial, la humedad del suelo, escorrentía del suelo, y la contribución del agua subterránea a la escorrentía. Controla el tiempo de escurrimiento y tiene relación directa a la magnitud de las crecidas. (Villón Béjar, 2004)

Pendiente del cauce: Considerada como “el cociente que resulta de dividir, el desnivel de los extremos del tramo, entre la longitud horizontal del tramo” (Villón Béjar, 2004).

La cuenca como unidad hidrográfica, según Villón Béjar, debe ser estudiada en diferentes aspectos, ya que no basta especificar su delimitación topográfica, su extensión y forma. Es necesario efectuar una caracterización integral que permita definir lo que técnicamente es posible realizar en ella. Deben tomarse en cuenta las prácticas de uso del suelo para definir las prescripciones más adecuadas en la administración de los recursos naturales contenidos, para lo cual, el agua se convierte en el elemento integrador del estudio. Es importante analizar:

- a. Características geológicas y geomorfológicas: Las características geológicas de los materiales que forman el suelo determinan en un alto grado su permeabilidad lo que a su vez afecta el escurrimiento.
- b. Tipo de suelo: Es evidente el papel importante que juega el suelo en la cubierta vegetal, siendo por tanto necesario su conocimiento tanto para establecer un mejor aprovechamiento como para evitar deterioros irreversibles o la aparición

de fenómenos perjudiciales derivados de su uso inadecuado, El suelo es un material complejo en el que aparecen tres fases: sólido, agua y gas. La fase sólida está formada de material mineral y sustancias orgánicas. El agua interviene en la constitución de las rocas y de los minerales, siendo el aire y el vapor de agua los principales gases que aparecen.

- c. Cobertura vegetal: En la cuenca suele haber diferentes tipos de uso del suelo. La vegetación forestal influye en la cantidad de agua interceptada, en la infiltración y en el escurrimiento superficial y subterráneo para el mantenimiento de la corriente en la estación seca. El manejo de la cobertura vegetal es muy importante para minimizar la tasa de escorrentía y el arrastre de sedimentos por unidad de superficie. La principal función del bosque, como protección contra inundaciones, es la de prevenir desprendimientos de tierra y mantener el sedimento grueso y otros restos fuera de la corriente, estos materiales con frecuencia obstaculizan los cauces y elevan los niveles de crecidas del río. Dentro de esta caracterización conviene mencionar las zonas de vida y áreas silvestres protegidas de Costa Rica, las cuales también poseen factores ya determinados que ayudan a describir una cuenca.
- d. Régimen climático: Es necesario hacer una exhaustiva colección de datos de las estadísticas climáticas en los sensores existentes, representativos de las condiciones prevalecientes dentro de una cuenca. Entre ellas es importante describir la temperatura, brillo solar, precipitación y evapotranspiración (Villón Béjar, 2004).

## 2.5 Caudal

Caudal es el volumen de escorrentía superficial por unidad de tiempo, principal variable que caracteriza la escorrentía superficial. (Serrano Pacheco, 2016)

$$Q = \frac{\text{Volumen}}{\text{tiempo}} \left( \frac{m^3}{s} \right) \quad (5)$$

La hidrometría es la rama de la hidrología que estudia la medición del escurrimiento. Para este mismo fin, es usual emplear otro término denominado aforo. Aforar una corriente significa determinar, con mediciones, el caudal que pasa por una sección dada y en un momento determinado (Villón Béjar, 2004).

Existen diversos métodos para determinar el caudal de una corriente de agua, cada uno aplicable a diversas condiciones, según el tamaño de la corriente o la precisión con que se requieran los valores obtenidos. Los métodos más utilizados son:

### 2.5.1 Método de estimación

Una forma sencilla de aproximar el valor del caudal de un cauce es realizar el aforo con flotadores. Mediante este método, se mide la velocidad superficial ( $v$ ) de la corriente y el área de la sección transversal ( $A$ ). Luego, con estos valores, se aplica la ecuación de la continuidad y se calcula el caudal con la fórmula:

$$Q = v \times A \quad (6)$$

Para realizar este aforo, se debe escoger en lo posible un tramo recto del cauce de longitud  $L$ .

El procedimiento para medir la velocidad superficial de la corriente es la siguiente:

- Medir la longitud ( $L$ ) de un tramo  $AB$ .
- Medir con un cronómetro el tiempo ( $T$ ), que tarda en desplazarse el flotador (botella lastrada, madera, cuerpo flotante natural) en el tramo  $AB$ .
- Calcular la velocidad superficial:

$$v = \frac{L}{T} \quad (7)$$

Para el cálculo del área, el procedimiento es el siguiente:

- Calcular el área en la sección  $A$  ( $A_A$ )
- Calcular el área en la sección  $B$  ( $A_B$ )
- Calcular el área promedio

$$A = \frac{A_A + A_B}{2} \quad (8)$$

Para calcular el área en cualquier de las secciones, hacer lo siguiente:

- Medir el espejo de agua ( $T$ )
- Dividir  $T$ , en cinco o diez partes (midiendo cada 0.20, 0.30, 0.50, etc), y en cada extremo medir su profundidad.
- Calcular el área para cada tramo, usando el método del trapecio.

$$A_1 = \frac{h_0 + h_1}{2} \quad (9)$$

- Calcular el área total de una sección:

$$A_A = \Sigma A_i \quad (10)$$

Nota: Este método es el más inexacto, pero da una aproximación inicial del caudal. (Villón Béjar, 2004)

### 2.5.2 Método Área-Velocidad

Para este método, se emplea el correntómetro o molinete. Estos son aparatos que miden la velocidad en un punto dado del curso del agua. Esta velocidad es medida en los instrumentos, por medio de un elemento móvil que detecta la velocidad de la corriente y transmite las indicaciones de un interruptor encargado de cerrar un circuito eléctrico, cuando ha dado un cierto número de vueltas, sobre un contador o cronometro (de impulsiones de sonido, señales luminosas, digitales, etc).

Hay muchos tipos de correntómetros: unos son de eje vertical, sin hélice, donde el elemento móvil son pequeñas copas (como en un anemómetro); otros, de eje horizontal y el elemento móvil es una hélice.

Los correntómetros son vendidos con un certificado de calibración, en el cual figura la fórmula que debe utilizarse, para calcular las velocidades a partir del número de vueltas por segundo de la hélice determinada, que puede anotarse bajo la fórmula:

$$v = a x n + b \quad ( 11 )$$

Donde:

$v$ = velocidad de la corriente, en m/s.

$n$ = número de vueltas de la hélice por segundo.

$a$ = paso real de la hélice, en m.

$b$ = velocidad llamada de frotamiento, en m/s.

Cabe señalar que, en realidad, la velocidad se mide indirectamente, ya que en la práctica lo que se mide es el tiempo que emplea la hélice para dar un cierto número de revoluciones. Para cada hélice, se calcula la velocidad mediante una fórmula propia.

El aforo con correntómetro permite explorar el campo de velocidades en la sección en la que se quiere medir el caudal líquido. La ubicación ideal de una sección es aquella en la cual se cumple las condiciones siguientes:

- Los filetes líquidos son paralelos entre sí.
- Las velocidades son suficientes para una buena utilización del correntómetro.
- Las velocidades son constantes para una misma altura de la escala limnimétrica.

La primera condición exige, a su vez:

- Un recorrido rectilíneo entre dos riveras o márgenes francas.
- Un lecho estable.
- Un perfil transversal relativamente constante, según el perfil en longitud.

Es evidente que toda irregularidad del lecho del río (piedras, vegetación arbustiva, bancos de arena), altera las condiciones del flujo y constituye un factor desfavorable para las medidas. Estas influencias son más notables en los cursos de agua más pequeños; por eso, es más fácil aforar con una misma precisión relativa un gran río que uno pequeño, un río en aguas altas que otro en estiaje (Villón Béjar, 2004).

### 2.5.3 Método Área-Pendiente

Con este método se utiliza la fórmula de Robert Manning (1891), donde el caudal se calcula con los datos obtenidos en el campo mediante levantamientos topográficos de un mínimo de 3 secciones transversales diferentes, separadas por una distancia L. Según Villón Béjar (2004), los trabajos de campo incluyen:

- Selección de un tramo recto del río. La longitud de dicho tramo debe ser tres veces el ancho del río y su sección central debe cumplir con las condiciones óptimas para realizar un aforo por molinete.
- Levantamiento de secciones transversales en cada extremo del tramo elegido, y determinar áreas hidráulicas, perímetros mojados y radios hidráulicos.
- Determinar la pendiente hidráulica S de la superficie de agua en análisis.
- Determinar el coeficiente de rugosidad de Manning de acuerdo con las condiciones físicas del cauce natural, para lo cual se emplea el método propuesto por Cowan (1956) (Ver Anexo 2).
- Aplicar la fórmula de Manning, que establece lo siguiente:

$$Q = \frac{1}{n} AR^{\frac{2}{3}} S^{\frac{1}{2}} \quad (12)$$

Donde:

$Q$  = caudal máximo, m<sup>3</sup>/s

$n$  = coeficiente de rugosidad

$A$  = área hidráulica promedio, m<sup>2</sup>

$R$  = radio hidráulico promedio, m

$S$  = pendiente, m/m

## 2.6 Fuentes de agua

Según Ricardo López Cualla, en su libro *Diseño de Acueductos y Alcantarillados* (2003), las fuentes de agua constituyen el elemento primordial en el diseño de un sistema de abastecimiento de agua potable y antes de dar cualquier paso es necesario definir su ubicación, tipo, cantidad y calidad. De acuerdo con la ubicación y naturaleza de la fuente de abastecimiento, así como a la topografía del terreno, se consideran dos tipos de sistemas de abastecimiento de agua potable: los de gravedad y los de bombeo.

En los sistemas de agua potable por gravedad, la fuente de agua debe estar ubicada en un punto más alto respecto al sitio donde se planea llevar el agua, para que esta fluya a través de tuberías, canales o túneles utilizando únicamente la fuerza de gravedad. En los sistemas de agua potable por bombeo, la fuente se encuentra localizada en elevaciones inferiores a las del lugar a abastecer, siendo necesario transportar el agua mediante sistemas de bombeo a reservorios de almacenamiento ubicados en elevaciones superiores al sitio donde se planea llevar el agua.

Para el diseño de un sistema de abastecimiento de agua potable, es importante seleccionar una fuente adecuada o una combinación de estas. Según el sistema de abastecimiento, se consideran tres tipos principales de fuentes: aguas subterráneas, aguas superficiales y aguas de lluvia.

Las aguas superficiales son aquellas que circulan sobre la superficie del suelo. Se producen por la escorrentía generada a partir de las precipitaciones o por el afloramiento de aguas subterráneas. Pueden presentarse en forma correntosa, como los ríos, arroyos y quebradas, o quietas, como océanos, mares, humedales, lagos y embalses. El agua superficial es toda agua abierta a la atmósfera y que puede estar sujeta a escorrentía, que sigue el camino que le ofrece menor resistencia (pendientes descendentes) hasta llegar a un curso de agua principal (océanos, mares, entre otros).

Si el nivel de agua superficial está por encima del nivel freático (influyente), se produce un aporte a las aguas subterráneas, por el contrario, si el nivel de las aguas superficiales está por debajo del nivel freático (efluente), se produce un aporte a las aguas superficiales. Por eso, existen las corrientes perennes, a pesar de que no se produzca precipitación.

La elección de la fuente de abastecimiento de agua, ya sea superficial, subterránea o de aguas de lluvia, debe cumplir requisitos mínimos de cantidad, calidad y localización.

- a. Cantidad: En el caso de una fuente de abastecimiento no regulada, esta debe tener un caudal superior al caudal de diseño en cualquier época del año, de manera que se pueda garantizar un suministro continuo. Se debe, entonces, realizar estudios hidrológicos que permitan establecer la curva de duración de caudales para corrientes superficiales, o pruebas de equilibrio para fuentes subterráneas.
  - b. Calidad: En la naturaleza no se encuentra, por lo general, agua con calidad aceptable para el consumo humano y se hace necesario su tratamiento. Se debe procurar que la calidad física, química y bacteriológica del agua cruda permita un tratamiento relativamente económico.
  - c. Localización: La fuente debe estar ubicada en un punto tal que su captación y conducción resulten técnica y económicamente factibles. Adicionalmente, se debe tener en cuenta para su localización los dos factores anteriores.
- (López Cualla, 2003)

## **2.7 Traspase de agua**

Para efectos de esta investigación, se propone únicamente la utilización de túneles y tuberías para el traspase de agua.

### **2.7.1 Túneles**

Son de especial interés para esta investigación los túneles de conducción de agua. Para Tapia Gómez (2005), estos túneles surgen generalmente de la necesidad de abastecer de agua potable a las ciudades, donde en ocasiones el acueducto tendrá la necesidad de atravesar colinas o excesivos obstáculos (Tapia Gómez, 2005).

En los túneles de conducción de agua no existen limitaciones de curvas o pendientes, las alineaciones podrán ser curvas o rectas y el perfil longitudinal puede tener todo tipo de inclinaciones, incluso la vertical, siempre que exista un adecuado gradiente hidráulico descendente de extremo a extremo. En términos generales, los túneles de conducción de agua deben cumplir con tres condiciones fundamentales: integridad, impermeabilidad y conductividad hidráulica (López Jimeno, 1998).

El hecho de realizar cualquier obra subterránea implica la resolución de problemas de ingeniería especialmente complejos, ya que, a diferencia de las obras superficiales, resulta difícil determinar con antelación los datos básicos de diseño. Por ello, para conocer el medio a través del cual se ubicará el túnel se hacen necesarios estudios preliminares que proporcionen una detallada investigación para que se pueda efectuar

la mejor elección del trazado y diseño. Esta necesidad implica realizar el estudio geológico del terreno, efectuar sondeos y túneles de reconocimiento (Soto Saavedra, 2004).

### **2.7.2 Tuberías**

Una tubería es un conducto que cumple la función de transportar agua u otros fluidos. La tubería está conformada por varios tubos, que son piezas huecas generalmente cilíndricas y que pueden estar hechas de varios tipos de materiales (hormigón, PVC, metal, entre otros). La forma más común de las tuberías es la circular, pero no es la única. Hay tuberías de diferentes formas: sección cuadrada, rectangular, entre otras. Según la clase de agua, se podrá transportar agua cruda (sin tratamiento) o agua ya potabilizada. Se le suele llamar aducción al transporte de las aguas que no han sido tratadas en la planta de potabilización y conducción al transporte de agua tratada (López Cualla, 2003).

En la tubería, la presión ejercida por el fluido en cada punto está representada gráficamente por la altura que alcanza el líquido en un pequeño tubo (piezómetro) conectado a la tubería. La altura que alcanza el fluido en el piezómetro, referida a un plano horizontal se denomina cota piezométrica (López Cualla, 2003).

Usualmente, en una tubería el líquido está confinado en un conducto cerrado y hay presión ejercida por el fluido sobre el contorno, originándose el movimiento del líquido por la diferencia de presiones. (Rocha Felices, 2007)

Por otro lado, para Rocha Felices (2007), los canales tienen una superficie libre que está en contacto con la atmósfera. La diferencia entre un canal y una tubería no es entonces la forma de la sección transversal, sino su comportamiento hidráulico.

Sin embargo, el flujo en un conducto cerrado, que pueda tener la forma de una tubería, no necesariamente es un escurrimiento a presión. Tal es el caso de un túnel o un conducto en el que, por estar parcialmente lleno, haya una superficie libre. Al haber contacto con la atmósfera, a través de la superficie libre, el conducto funciona hidráulicamente como un canal. En caso de túneles, la sección del canal puede ser revestida o excavada (Rocha Felices, 2007).

López Cualla (2003), de acuerdo con lo anterior, expresa las siguientes características de las clasificaciones con respecto a las dos condiciones hidráulicas en las que el agua puede ser transportada:

- A presión: Ocurre cuando toda la sección de la tubería se llena. Puede tener cualquier alineación, siempre y cuando esté por debajo de la línea piezométrica.

Se utilizan generalmente cuando la captación se hace desde un reservorio. En el caso del transporte de agua por conductos que funcionen a presión, podrá producirse el flujo por gravedad o por bombeo, y normalmente se hace por tuberías.

- A flujo libre: La lámina de agua se encuentra a la presión atmosférica y el transporte puede presentarse en estructuras construidas en el sitio (canales abiertos o cerrados) o por estructuras prefabricadas (tuberías). Las tuberías por gravedad se utilizan cuando el nivel de agua a la entrada es casi constante, en tomas por derivación directa. El flujo libre se presenta cuando el líquido fluye por la acción de la gravedad y su superficie se encuentra permanentemente en contacto con la atmósfera.

Para los efectos de esta investigación, se consideran todas las tuberías como conductos cerrados a superficie libre por gravedad.

## **2.8 Calidad del agua**

El agua potable se define como toda agua que no sobrepasa los máximos valores admisibles y recomendados estéticos, organolépticos, físicos, químicos, biológicos y microbiológicos que se utiliza para consumo humano y no causa daño a la salud. (Art.4, inciso a, Reglamento de la Calidad de Agua Potable, 2015)

Es fundamental asegurar que el agua que se usa para consumo humano tenga una calidad adecuada. Consumir agua potable permite reducir de forma significativa la exposición de las poblaciones a enfermedades y los beneficios en la salud son considerables (Buelta Serrano & Martínez, 2011).

A continuación, se presenta una descripción de los indicadores que se analizan para evaluar la calidad del agua potable, esto según el Reglamento para la Evaluación y Clasificación de la Calidad de Cuerpos de Agua, N° 33903-MINAE-S (2007) y el Reglamento de la Calidad de Agua Potable N°38924-S (2015).

### **2.8.1 Parámetros físicos**

**Color:** La existencia de alguna tonalidad en el agua influye desde un punto de vista estético. Se clasifica color aparente, aquel causado por la presencia de materia en suspensión y el color verdadero, debido a extractos coloidales vegetales u orgánicos.

**Olor y sabor:** Se debe a la presencia de sustancias químicas volátiles y a la materia orgánica en descomposición. Las mediciones se hacen con base en la dilución

necesaria para reducirlos a un nivel apenas detectable por los sentidos. Se considera un parámetro muy subjetivo, no brinda información específica de la calidad del agua, pero es importante para la percepción del usuario.

**Temperatura:** Influye en la solubilidad del oxígeno, y afecta el equilibrio del pH principalmente. La mayor parte de los procesos biológicos ocurren en rangos de temperatura de 25°C a 35°C, por lo que regular valores extremos es de suma importancia.

**Turbiedad:** Es la presencia de materia finamente dividida o en estado coloidal que dispersa la luz a través del agua. Un agua turbia estéticamente es desagradable y es rechazada por el consumidor. Además de reflejar la pureza en el agua a consumir, también interfiere en procesos de tratamiento de las aguas como es en la desinfección con agentes químicos o con radiación ultravioleta.

**Sólidos suspendidos:** Se identifica como un sólido materia que permanece después de la evaporación y secado entre 103°C y 105°C, compuesto por una gran cantidad de materiales orgánicos e inorgánicos. Se clasifican según su origen en volátiles y fijos; y según su tamaño en sólidos filtrables y suspendidos.

### **2.8.2 Parámetros químicos**

**Conductividad:** La conductividad es la medida de la capacidad del agua para conducir la electricidad y es un indicador de la materia ionizable total (aniones y cationes) presente en el agua. No debería presentarse conductividad en el agua potable.

**Potencial de hidrógeno:** Es un indicador de la acidez o basicidad de una sustancia. Está determinado por el número de iones libres de hidrógeno ( $H^+$ ) en la materia. Se mide como el logaritmo negativo de la concentración del ión hidrógeno. Por lo que por ser un factor logarítmico; cuando una solución se vuelve diez veces más ácida, el pH disminuirá en una unidad. La escala de pH va de 0 a 14, siendo ácidas las sustancias con pH menores a 7 y alcalinas o básicas con pH mayores a 7.

**DBO<sub>5</sub>:** Demanda Bioquímica de Oxígeno, es una medida aproximada de la cantidad de materia orgánica bioquímicamente degradable presente en una muestra de agua, se define por la cantidad de oxígeno requerido por los microorganismos aeróbicos presentes en la muestra para oxidar la materia orgánica a una forma inorgánica estable. Debe ser medido a los cinco días y a 20 grados centígrados.

**DQO:** Demanda Química de Oxígeno, es una medida equivalente al oxígeno requerido para oxidar la materia orgánica, en una muestra de agua que es susceptible a

oxidación por un oxidante químico fuerte como el dicromato (en medio ácido y en presencia de una fuente de calor).

**Oxígeno disuelto:** Es la cantidad de oxígeno que está disuelto en el agua. Está íntimamente ligado a la contaminación por materia orgánica del agua y a las condiciones de soporte de vida que el recurso puede ofrecer, varía directamente con la presión atmosférica a cualquier temperatura.

**Sólidos disueltos:** Corresponde a una medida de la materia presente en una muestra de agua, dicha determinación implica procesos de filtración y evaporación. Su control es de gran interés en procesos industriales principalmente. A diferencia de los sólidos suspendidos estos no se logran separar por una filtración.

**Nitrógeno:** El contenido de nitrógeno en el agua se utiliza como indicador del tiempo en que esta fue contaminada. El nitrógeno total es la suma de nitrógeno de Kjeldahl, el cual está compuesto por el nitrógeno amoniacal más el nitrógeno orgánico, y nitratos y nitritos. Los compuestos nitrogenados aparecen en el agua potable a causa de fugas o filtraciones procedentes de sitios ganaderos, zonas de césped y jardines, que llegan al agua subterránea.

**Cobre:** El cobre es un metal de alto interés en calidad de agua de consumo porque tiene un doble carácter, es un metal esencial para el ser humano y puede, tanto por deficiencia como por exceso, producir efectos perjudiciales en la salud. La presencia de cobre en aguas de consumo puede ser de origen natural o antrópico, este último por efecto de lixiviación/corrosión a causa de las características físico-químicas de la matriz del agua que entra en contacto con los materiales que contienen cobre.

**Dureza:** En función del pH, se definen las aguas blandas (dureza menor que 100 mg/l aproximadamente) o aguas duras (dureza mayor que 500 mg/l), pueden ser corrosivas en tuberías metálicas, lo que provocaría pérdidas económicas y pérdidas del caudal de agua por fugas. Por otro lado, tuberías corroídas aceleran el crecimiento bacteriano en los sistemas de almacenamiento y distribución del agua potable, produciendo un deterioro del índice de calidad del agua, modificando su sabor, olor y turbidez. La dureza del agua se debe al contenido de calcio y, en menor medida, de magnesio disuelto, sin embargo, suele expresarse como concentración equivalente de carbonato cálcico ( $\text{CaCO}_3$ ) o como miliequivalentes.

**Fósforo:** Su contenido en el agua se presenta principalmente en forma del ion fosfato, y las principales fuentes de este compuesto son: aguas tratadas con agentes floculantes, detergentes de uso industrial o doméstico y fertilizantes agrícolas.

Alcalinidad: Es la presencia de sustancias hidrolizables en agua y que como producto de hidrólisis generan el ión hidroxilo ( $\text{OH}^-$ ), como son las bases fuertes, y los hidróxidos de los metales alcalinotérreos; contribuyen también en la alcalinidad los carbonatos y fosfatos y la presencia de boratos y silicatos. La alcalinidad resulta de utilidad a la hora de seleccionar y evaluar tratamientos químicos de agua.

### **2.8.3 Parámetros microbiológicos**

Son pruebas de laboratorio que se efectúan a una muestra de agua para determinar la presencia o ausencia, tipo y cantidad de microorganismos.

Coliformes fecales: Bacilo gramnegativo no esporulado, que puede desarrollarse en presencia de sales biliares u otros agentes tensoactivos con propiedades similares de inhibición de crecimiento; no tienen citocromo oxidasa y fermentan la lactosa con producción de ácido, gas y aldehído a temperaturas de 44 o 44,5 °C, en un período de 24 a 48 horas. También se les designa como Coliformes Termo-resistentes o Termotolerantes.

Son considerados como indicadores de contaminación fecal en el control de calidad del agua potable en razón de que, en los medios acuáticos, los coliformes son más resistentes que las bacterias patógenas intestinales y porque su origen es principalmente fecal. Por tanto, su ausencia indica que el agua es bacteriológicamente segura.

Asimismo, la cantidad en el agua es proporcional al grado de contaminación fecal; mientras más coliformes se aíslan del agua, mayor es la gravedad de la descarga de heces.

La bacteria *Escherichia coli* (*E. coli*) es la bacteria más conocida del grupo de los coliformes, se encuentra usualmente en los intestinos animales de seres mamíferos sanos de sangre caliente. Es el principal organismo anaerobio facultativo del sistema digestivo. En el control de la calidad del agua se considera como indicador de contaminación fecal reciente. (Organización Mundial de la Salud, 2006)

El Reglamento para la Evaluación y Clasificación de la Calidad de Cuerpos de Agua N° 33903-MINAE-S, 2007, establece de acuerdo a la clasificación de los cuerpos de agua superficial, cinco clases, según el uso potencial y tratamiento que se le requiera dar al agua, para el caso de esta investigación, el uso de interés consiste en abastecimiento de agua para uso y consumo humano, y con un tratamiento simple con desinfección, ó bien con un tratamiento convencional, razón por la cual de las cinco

clases establecidas, sólo son de interés la clase uno y dos, cuyos parámetros se exponen de seguido:

Cuadro 2. Parámetros para la determinación de la calidad de las aguas de cuerpos superficiales.

<b>Parámetros (Unidades)</b>	<b>Clase 1</b>	<b>Clase 2</b>
Turbiedad (UTN)	<25	25 a < 100
Temperatura (°C)	(1)	(1)
Potencial de hidrógeno (pH)	6.5 a 8.5	6.5 a 8.5
Nitratos, NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg N/L)	<5	5 a <10
Demanda química de oxígeno (mg/L)	<20	20 a <25
Cloruros (mg/L)	<100	100 a 200
Fluoruros (mg/L)	<1.0	1 a 1.5
Color (Pt-Co)	2.5 < 10	10 a 100
Sólidos suspendidos totales (mg/L)	<10	10 a 25
Sólidos disueltos (mg/L)	<250	250 a <500
Arsénico (mg/L)	< 0.01	< 0.01
Cobre (mg/L)	<0.5	0.5 a <1
Mercurio (mg/L)	<0.001	0.001
Níquel (mg/L)	<0.05	0.05
Plomo (mg/L)	<0.03	0.03 a < 0.05
Selenio (mg/L)	<0.005	0.005 a < 0.010
Sulfatos (SO <sub>4</sub> ) <sup>-2</sup> (mg/L)	<150	150 a 250
Coliformes fecales (NMP/100 ml)	<20	20 a 1000

(1) Natural o que no afecte el uso indicado

Fuente: (Reglamento para la Evaluación y Clasificación de la Calidad de Cuerpos de Agua N° 33903-MINAE-S, 2007)

## **CAPÍTULO 3. MARCO METODOLÓGICO**

### **3.1 Levantamiento y procesamiento de datos GNSS y GPS**

Esta investigación utilizó la tecnología GNSS, para georreferenciar con gran precisión, en el orden de los centímetros, la ubicación del sitio de aforo en el Río Patria. Es importante aclarar que, si bien la tecnología GNSS permite alcanzar precisiones milimétricas, las condiciones del sitio de medición de esta investigación permitieron obtener precisiones máximas en el rango de centímetros, ya que la zona es montañosa y con bosque denso, factores que interfieren en la recepción de la señal satelital.

Las coordenadas tridimensionales del sitio de aforo (este, norte y elevación) obtenidas por medio de esta tecnología, fueron utilizadas para comprobar la posición y precisión con respecto al Modelo de Elevación Digital (DEM) utilizado en esta investigación, así

como para georreferenciar en la proyección CRTM05 las imágenes obtenidas con sistemas aéreos no tripulados y los levantamientos realizados con estación total.

Las mediciones GNSS se realizaron en modalidad estática relativa con postproceso en gabinete. Se utilizaron como puntos base las siguientes Estaciones de Medición Continua (EMC): AACR, ubicada en la sede central del Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (AyA), bajo la administración de la Dirección de Topografía de la misma Institución, ETCG ubicada en Heredia, en la sede central de la Universidad Nacional (UNA), bajo la administración de la Escuela de Topografía Catastro y Geodesia, y RIDC que se encuentra en Zapote en las oficinas del Registro Nacional, bajo la administración del Instituto Geográfico Nacional (IGN).

También, se efectuaron levantamientos con navegador GPS para el trazado, guía y referencia de las rutas de acceso a los puntos de interés, así como para almacenar datos de algunos puntos de referencia importantes durante el trayecto, como por ejemplo los pasos sobre quebradas.

Los equipos utilizados para las mediciones GNSS y GPS son los siguientes:

- Receptor Leica Viva GS15, GNSS Smart antena de doble frecuencia con seguimiento de señales GPS (L1, L2, L2C, L5) y Glonass (L1, L2).
- Navegador de mano modelo GPSMAP 62s, marca Garmin.

Una vez establecida la modalidad de medición estática y efectuado el levantamiento de campo respectivo, se procedió a realizar el postproceso de los datos GNSS utilizando el programa MAGNET TOOLS de la marca Topcon. Dicho programa permite el cálculo de coordenadas georreferenciadas.

En primer lugar, se descargaron los datos GNSS (archivos crudos) por medio de los receptores de doble frecuencia marca Leica, modelo GS15. Durante este proceso se anotaron datos como el nombre del punto medido, la duración y el día de la medición, así como la altura a la cual se colocó la antena del receptor.

Mediante los servicios en línea que ofrece el Registro Nacional, a través del Proveedor de Servicio de Estaciones de Referencia “SpiderWeb” (<http://rim-data-gnss.rnp.go.cr/spiderweb/frmlIndex.aspx>), y la Universidad Nacional, a través del Centro Nacional de Procesamiento de Datos GNSS de la Escuela de Topografía Catastro y Geodesia (<http://www.cnpdg.una.ac.cr/index.php/download>), se procedió a descargar los datos GNSS de las estaciones de medición continua RIDC, AACR y ETCG, con las mismas horas de medición del Receptor GS15. Dichas EMC se

utilizaron como puntos fijos y con coordenadas conocidas para el amarre horizontal y vertical de los puntos medidos.

Para realizar el cálculo de las coordenadas en el software MAGNET TOOLS, inicialmente se definieron variables como:

- Zona horaria (UTC-6, América Central).
- Sistema de coordenadas (Datum WGS84, modelo geoidal EGM2008, proyección cartográfica CRTM05).
- Parámetros del procesamiento de ajuste (nivel de confianza y criterio de rechazo de las observaciones).

Posteriormente, se cargaron los datos GNSS al proyecto creado, se eliminó el ruido en las observaciones (interferencia en la señal recibida) y se seleccionaron los vectores a utilizar, para luego proceder a realizar un postprocesamiento de los datos.

Una vez concluido el paso anterior, se ingresaron y fijaron las coordenadas de los puntos conocidos (AACR, ETCG y RIDC), las cuales están integradas a la Red Geodésica Nacional de Referencia Horizontal de Primer Orden, y se realizó el ajuste de los puntos medidos con el receptor GS15. Estos se definieron como puntos base para la georreferenciación a la proyección cartográfica CRTM05 y al sistema geodésico CR05 de todas las mediciones de campo efectuadas para fines del proyecto.

Las elevaciones elipsoidales obtenidas con la tecnología GNSS fueron reducidas a elevaciones ortométricas utilizando el Modelo Geoidal EGM08. Las alturas en estos puntos fueron expresadas como elevaciones geoidales, por lo que no están estrictamente referidas al nivel medio del mar. En ese sentido, no se utiliza la nomenclatura “msnm”.

## **3.2 Obtención del modelo digital de superficie (MDS) mediante sistemas aéreos no tripulados**

### **3.2.1 Características técnicas**

Para esta investigación, se utilizó el dron Phantom 4 Pro Plus con una cámara de cardán estabilizada de 3 ejes con un sensor CMOS de 1" de 20 MP, capaz de disparar hasta 4 K / 60 fps de vídeo y así como ráfagas de fotos de hasta 14 fps, con un objetivo 22 mm programada para disparar en modo de velocidad de obturación fija de 1/8000 s con una apertura relativa de f/8 e ISO. Las imágenes se registraron en formato RAW y JPG, en la máxima definición soportada por el equipo, 18 MP.

La obtención del modelo de superficie y la ortofoto del sitio de aforos por medio de sistemas aéreos no tripulados comprendió 4 etapas: a) Plan de Vuelo, b) Apoyo Terrestre, c) Registro fotográfico y d) Proceso de datos capturados.

A continuación, se describe la metodología utilizada en cada fase.

### **3.2.2 Plan de vuelo**

El diseño del vuelo se realizó en función de la resolución espacial, del tipo de terreno, su ubicación, la extensión, vegetación, las condiciones meteorológicas imperantes y fundamentalmente la velocidad del viento.

Para esta investigación, se voló sobre un sector de la subcuenca del Río Patria, en el sitio definido para realizar los aforos, localizado en la coordenadas proyección CRTM05, Este: 497646.264 m, Norte: 1114806.056 m, Elevación: 1189.816 m, en el Parque Nacional Braulio Carrillo.

El día 05 de diciembre 2017 se realizó la visita al sitio, las condiciones meteorológicas se mantuvieron con lluvias constantes, para realizar el plan de vuelo se utilizó el programa PIX4Dcapture, se realizaron 5 misiones variando los parámetros de altura de vuelo en función de la altura de la vegetación y de la mejor cobertura que se pudiera obtener y finalmente se utilizó la misión N° 4, compuesta por 60 imágenes tomadas a una altura de 120 m, con un 60 % de superposición (traslapes longitudinal y transversal), el objetivo de los recubrimientos fotográficos fue el de poder aplicar el principio de la visión estereoscópica, el tiempo de obturación fue de 1/8000 s a una velocidad de 6 m/s, las tomas se realizaron con una cámara de cardán estabilizada de 3 ejes con un sensor CMOS de 20 MP de 1 pulgada. A continuación, se describen las misiones planificadas.

Cuadro 3. Misiones planificadas para la obtención de la fotografía aérea

Misión	Altura de Vuelo (m)	Hora	Condiciones Climáticas	Producto
1	80	9:30 am	Lluvias, nubes, fuertes vientos	No se puede elevar el drone
2	90	10:15 am	Lluvias, nubes, fuertes vientos	Se eleva el drone, se trae de regreso por lluvia
3	100	11:05 am	Mejoran las condiciones climáticas, un poco de sol, sin nubes y vientos leves	Se eleva el drone inicia el recorrido, pero se trae de regreso por la alta vegetación
4	120	11:15am	Mejoran las condiciones climáticas, un poco de sol, sin nubes y vientos leves	Se eleva el drone realiza el recorrido.
5	110	11:40 am	Vientos leves, sin sol, se empieza a nublar	Se eleva el drone, se trae de regreso por lluvia repentina

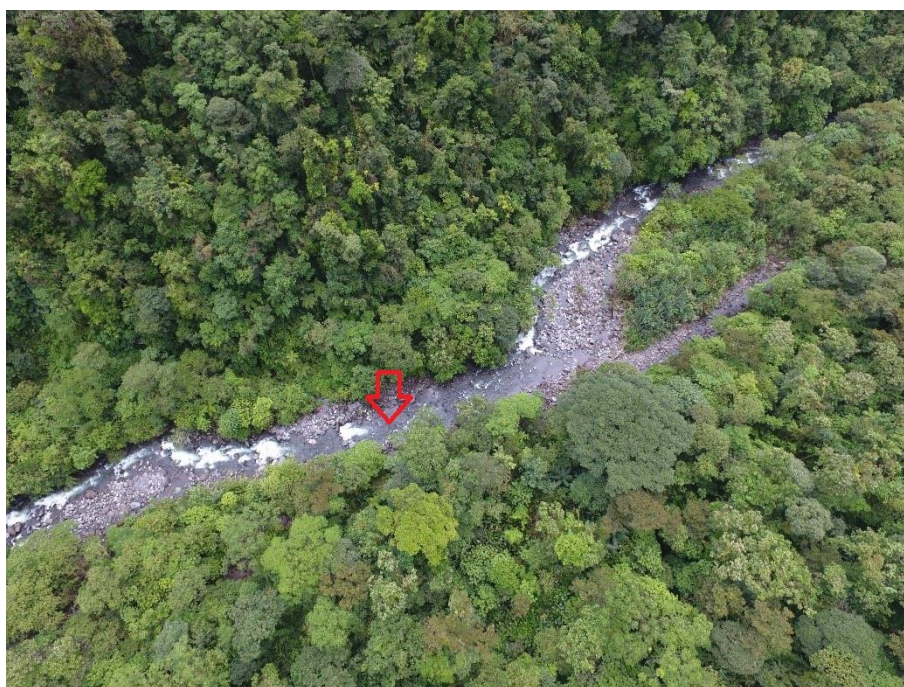


Figura 2. Sitio de aforo, Río Patria, diciembre 2017.

El plan de vuelo misión N° 4 se realizó definiendo recorridos rectangulares, con una altura de vuelos 120 m de altura, con puntos de referencia (waypoints) que constituyeron la ruta que siguió el drone capturando imágenes, cada punto de referencia identificado es un conjunto de coordenadas en un punto específico.

Se establecieron puntos de control terrestre (PC) dentro de la zona de interés, levantados con equipos GNSS para obtener coordenadas de alta precisión para su posterior comparación y aplicación de correcciones a los datos fotogramétricos.

Para la delimitación de la zona de vuelo se utilizó una imagen georreferenciada obtenida desde el Google Earth que fue exportada al programa PIX4Dcapture, desde el cual se planificaron las diferentes misiones ingresando parámetros como: distancia entre tomas, porcentaje de traslapes entre las imágenes consecutivas, altura de vuelo, tiempo de obturación de la cámara, velocidad de ascenso o desplazamiento del aparato.



Figura 3. Descripción de los recorridos rectangulares.

La misión N° 4 y sus valores asociados: altura de vuelo: 120 m, resolución espacial: 3.27 cm/píxel, duración del vuelo: 14 minutos, 17 segundos, área de cobertura 411 x 404 m, 60 % de superposición (traslapes longitudinal y transversal), se guardaron en la memoria del piloto automático para la realización del vuelo y para su posterior utilización en postproceso.

### 3.2.3 Apoyo terrestre

Para el apoyo topográfico, se colocaron 3 puntos de control terrestre (PC) dentro de la superficie a fotografiar, los puntos de control fueron materializados con cruces de color naranja que se pintaron sobre las rocas más grandes expuestas sobre el cauce del Río Patria, cerca del sector donde se realizaron los aforos, estas señales se levantaron con GPS diferencial de doble frecuencia durante intervalos de tiempo de 20 minutos en cada punto, para la obtención de las coordenadas de alta precisión (latitud, longitud y elevación).

La finalidad de los puntos de control terrestre establecidos fue la obtención de la información necesaria para la georreferenciación y un mayor control en la comparación y aplicación de corrección plana y altimétrica de las imágenes, se logró una resolución

espacial de 2.74 cm/pix de la zona de estudio donde se realizaron los aforos y el levantamiento hidrográfico. La precisión de los puntos de control terrestre fue de  $\pm 10$  mm en los ejes X, Y (planimetría) y de 8 mm en Z (altimetría), las precisiones estuvieron de acorde con la escala del producto. Se obtuvo la posición de los puntos sobre el terreno y estos también se identificaron claramente en las fotografías para poder establecer una correcta orientación.



Figura 4. Detalle punto de control sobre cauce del Río Patria, diciembre 2017

### 3.2.4 Registro fotográfico

Las imágenes aquí utilizadas se obtuvieron según el plan de vuelo planificado (misión N° 4), se registró una imagen en cada punto programado. Mientras se produjo el registro de las imágenes, se visualizó en tiempo real toda la información del estado del dispositivo y posición del mismo, y a su vez se hizo un seguimiento en tiempo real del drone a través de la cámara de video que llevaba a bordo. Las imágenes se guardaron en la memoria de almacenamiento de la cámara y tras finalizar el vuelo se realizó en gabinete la descarga de datos de vuelo de las imágenes para el posterior procesamiento de dicha información asociando los datos de vuelo al momento de toma de cada imagen. Para la misión N° 4, se tomaron 60 imágenes, las otras misiones programadas no se utilizaron, ya que no cumplieron con las condiciones para poder levantar el drone, la altura de vuelo, velocidad del viento y fundamentalmente las condiciones meteorológicas imperantes en la zona.

### 3.2.5 Proceso de datos capturados

Una vez tomadas las fotografías, los parámetros asociados aparecen en cada imagen descargada, los cuales se utilizaron para corregir la perspectiva y obtener las coordenadas de los puntos de apoyo. Posteriormente, se realizó el cálculo de los parámetros de orientación externa de cada una de las fotografías.

Los datos asociados a cada imagen fueron: coordenadas geográficas (latitud, longitud), actitud del dron (yaw  $\alpha$ , pitch  $\beta$  y roll  $\gamma$ ), la rotación del avión en los tres ejes de navegación, altura de vuelo y distancia focal de la cámara.

Para esta investigación, el procesamiento de las imágenes se realizó con el programa Agisoft Photoscan este software permitió incorporar imágenes aéreas capturadas por el dron y comenzar un proceso de restitución de imágenes por correlación de píxel entre los elementos representados en cada imagen. El programa realiza una alineación de las imágenes con el fin de buscar puntos espaciales coincidentes por el solapamiento de las imágenes, además soluciona los parámetros de orientación interna y externa de la cámara y posteriormente, a través de un algoritmo propio, encuentra las ubicaciones de las cámaras aproximadamente y las ajusta utilizando otro algoritmo de ajuste tipo 'haz'.

A continuación, se creó una densa nube de puntos que comenzaron a reconstruir el modelo de una manera más o menos realista. Pese a no representar una malla ráster continua, mostró una nube de puntos mediante valores RGB donde se apreció con cierta nitidez la zona territorial.

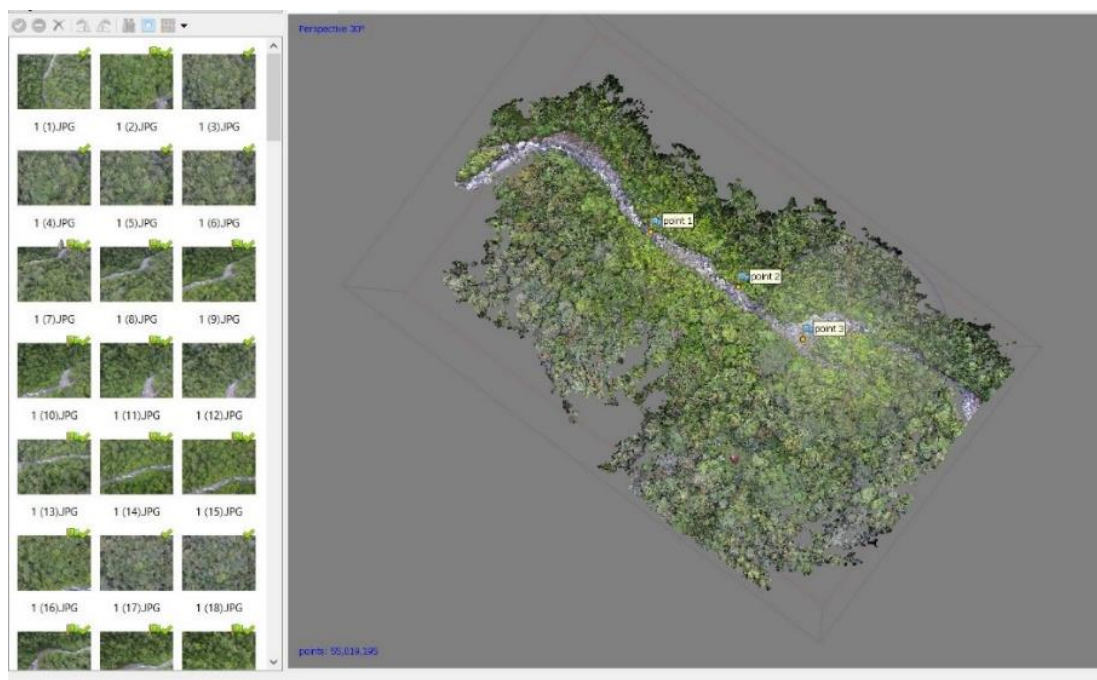


Figura 5. Alineación y generación de nubes de puntos.

Una vez construida la malla, se reconstruyó la superficie del terreno a través de dos opciones: a) Método suave y lento que genera mapas de profundidad para formar la malla del objeto, y b) Método rápido que utiliza un enfoque de múltiples-vistas para realizar la geometría del objeto, para esta investigación se utilizó la opción de método suave y lento, porque generó un mejor mapa para formar la malla.

Después de que se reconstruyó la geometría (la malla), se texturizó y se usó para la generación del ortomosaico y el modelo de superficie (MDS) que se muestran en seguida.



Figura 6. Ortomosaico a partir de datos de vuelo de drone, Río Patria, diciembre 2017

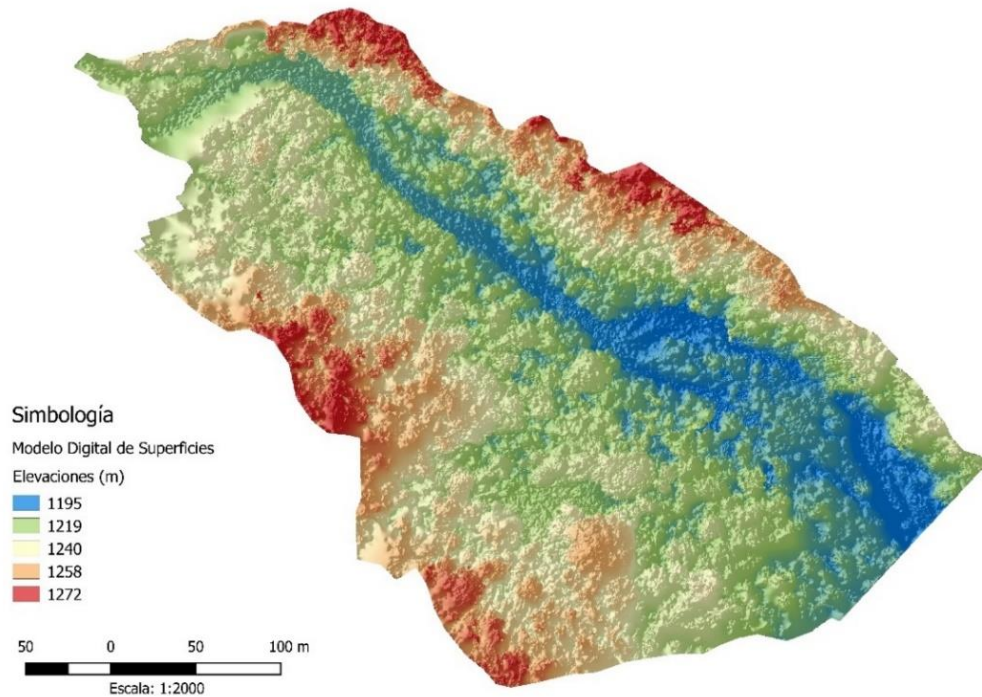


Figura 7. Modelo de Superficie (MDS) a partir de datos de vuelo de drone, Río Patria, diciembre 2017.

### 3.3 Determinación de caudal

#### 3.3.1 Aforos

Se utiliza el método de área velocidad, empleando un molinete de eje vertical, marca Rickly, complementado con el uso de cronómetro, cinta métrica de 30 m, audífonos y varillas de vadeo, bajo el siguiente procedimiento:

Primero, se subtiende la cinta métrica sobre la línea de aforo, para determinar el ancho de la sección transversal y calcular la cantidad de verticales.

Posteriormente, se lubrica la cámara de contactos del molinete y se le realiza la prueba de giro, constatando que el resultado de esta prueba es mayor a 100 segundos de duración libre de la influencia del viento y que las señales auditivas provenientes del audífono sean nítidas.

Luego, se da lectura a la escala inicial del espejo de agua iniciando en la margen derecha, se miden las profundidades del río utilizando las varillas de aforo y velocidades de flujo, se determinan ambas variables en cada una de las verticales calculadas hasta concluir en la margen izquierda. Se lee la escala final del espejo de agua y se concluye el aforo en su etapa de campo.

Con toda la información recopilada en un formulario de aforos, se procede a calcular en oficina cada uno de los aforos realizados durante la campaña, el cálculo del caudal, perímetro mojado, el área de la sección transversal y el radio hidráulico, utilizando un programa de cálculo de aforos en Microsoft Excel.

### **3.3.2 Levantamiento hidrográfico**

Se utiliza el método de área-pendiente, conocido como levantamiento hidrográfico, bajo la siguiente metodología:

Se eligen tres secciones transversales en lo ancho del río, en un tramo de 60 m de largo, hasta alcanzar los niveles de máxima creciente, establecida por observación de crecimiento de la vegetación presente al momento. Con utilización de una base GPS y sus respectivos receptores, se establecen puntos de control de todo el levantamiento, dichos puntos de control se utilizan para establecer las coordenadas X, Y y Z de las estaciones a partir de las cuales se realiza el levantamiento de las secciones transversales utilizando Estación Total, posteriormente se dibujan los sendos perfiles de las tres secciones transversales y de la pendiente hidráulica del tramo de estudio obtenida con el trazado de una línea compuesta de 8 puntos en el centro de este.

Utilizando el método de Cowan (1956), se establece el coeficiente de rugosidad como promedio aritmético de las cinco estimaciones realizadas por los investigadores para el nivel actual y el nivel de máxima crecida.

En busca del caudal promedio, se utiliza la fórmula de R. Manning ecuación ( 12 ), obteniendo todos sus factores del levantamiento de campo.

Las secciones transversales aportan el promedio aritmético de la variable área; de la nivelación de la pendiente hidráulica se obtiene la variable S; de la aplicación del método de Cowan se obtiene “n” (coeficiente de rugosidad) para el caudal actual y el de máxima creciente observada y, por último, de la medición del perímetro mojado y el área se obtiene el factor radio hidráulico.

### **3.3.3 Aforo por estimación**

El aforo por flotadores fue realizado en la primera incursión al sitio de aforos, para así obtener un valor aproximado del caudal a la fecha. El método utilizado fue el siguiente:

Se midió la longitud total del tramo (50.00 m), posteriormente, se establece la sección aguas arriba (inicio) y la sección aguas abajo (final).

En seguida, se mide el ancho y la profundidad en la sección aguas abajo obteniendo el área de dicha sección.

Los flotadores utilizados para aplicar este método fueron 12 bolas de poliestireno expandido (estereofón) de 6.00 cm de diámetro, las cuales se lanzaron una a una; 4 en la margen derecha, 4 en el centro del río y 4 en la margen izquierda.

El tiempo que tardó cada flotador en hacer el recorrido desde el inicio hasta el final fue medido con un cronómetro. De estos valores se eliminó el más alto y el más bajo para eliminar ambos extremos que se toman como “ruidos” de medición.

Obtenidos los tiempos de los flotadores en hacer el recorrido, se calcula la velocidad superficial ecuación (7) para cada caso, y se determina el valor de la velocidad promedio. Finalmente se realiza el cálculo del caudal utilizando la ecuación de la continuidad (6).

### **3.4 Trazado de rutas de trasvase**

#### **3.4.1 Modelo de Elevación Digital**

El trazado de los trasvases inició con el estudio de las hojas cartográficas a escala 1:50000 ABRA (Hoja 3345 I), BARVA (Hoja 3346 II), CARRILLO (Hoja 3446 III) e ISTARÚ (3445 IV) del Instituto Geográfico Nacional, con el propósito de ubicar espacialmente el área de investigación dentro del territorio nacional.

A través de la observación de las hojas cartográficas, fue posible tener un panorama amplio de la zona, ya que en ellas se representa el relieve y los elementos cartográficos más significativos como las carreteras, red hidrográfica, centros de población, zonas protegidas, entre otros. Sobre las hojas ABRA, BARVA, CARRILLO e ISTARÚ se establecieron los primeros esbozos de las rutas, tomando en cuenta especialmente diferentes elementos del relieve que inciden en la viabilidad de los tramos del trasvase.

Dentro de los elementos que se consideraron importantes, resaltan las pendientes que tendrán la tubería y el túnel, de manera que exista un desnivel adecuado entre el inicio y final de cada tramo, para que el agua que transita en su interior pueda ser transportada eficientemente. Además, en las propuestas se procuró obtener la menor longitud total para cada ruta, con el propósito de mejorar la eficiencia y el ahorro de recursos en términos constructivos.

También, se tomó en cuenta la menor afectación en centros de población a lo largo del trayecto, evadiendo sitios densamente poblados, así como evitar pasar por gran cantidad de propiedades privadas, para impedir el exceso de expropiaciones y demoliciones de edificios u otras obras. Por su parte, las rutas fueron llevadas, en la

medida de lo posible, por calles públicas secundarias o con menor densidad de tránsito, evitando perturbaciones al alto flujo vehicular existente en carreteras principales.

Posteriormente, se acudió a la aplicación de Google Earth para complementar el análisis preliminar del relieve, utilizando el Modelo de Elevación Digital que ofrece. Este modelo proporcionó la representación en tercera dimensión de los posibles trayectos a través del terreno, ajustándose las rutas a la superficie, y tomándose en cuenta la altitud y la planimetría.

En un siguiente paso, dejando atrás las aproximaciones y procurando datos más detallados y oficiales, se elaboró un Modelo de Elevación Digital (DEM, por sus siglas en inglés), cuyo insumo principal son las curvas de nivel oficializadas por el IGN, referenciadas al sistema CR05, proyección cartográfica CRTM05, datum WGS-84.

Para generar el DEM se utilizó la herramienta “Create TIN” del programa ArcGis, con la cual se obtuvo una estructura (denominada TIN, Red Triangular Irregular) de datos vectoriales, que divide el espacio geográfico en triángulos contiguos donde los vértices son puntos de muestra con valores “X”, “Y” y “Z”. Luego, se generó una superficie de tipo ráster (el DEM), empleando la herramienta “De TIN a ráster” en el mismo programa.

El DEM coincide topográficamente con las hojas cartográficas del IGN, con las ortofotos oficiales del IGN, con las ortofotografías obtenidas a partir de la utilización del Drone y con los puntos GPS obtenidos a partir de las mediciones GNSS realizadas en las giras de campo a la zona de estudio en la subcuenca del Río Patria.

Como el DEM se confeccionó basándose directamente en las curvas de nivel de las hojas cartográficas del IGN, las elevaciones obtenidas a partir de este, están referidas también a los bancos de nivel oficiales, por lo que, al estar enlazados a un mareógrafo, sí se expresan en metros sobre el nivel del mar (msnm).

Cabe mencionar que no existe coherencia cartográfica con la información proveniente del Atlas Costa Rica 2008, del Instituto Tecnológico de Costa Rica (Atlas del TEC), ya que las curvas de nivel que este posee presentan un desplazamiento sistemático en el sentido norte-este con respecto al resto de la información recopilada. Por esta razón, no se utilizó en la investigación como insumo de elevaciones, únicamente se usó el Atlas para obtener información básica para la caracterización de la subcuenca en estudio, lo cual se desarrolla en el Capítulo 4 de este documento.

Los recorridos obtenidos a partir del navegador GPS durante las giras de campo, suministraron coordenadas y descripciones para cada punto medido, lo cual hizo posible emparejar la posición de elementos identificables en la cartografía.

El área de estudio propuesta para este proyecto es primordialmente la subcuenca del Río Patria, sin embargo, por tratarse de un trasvase de aguas, al área de interés se incorporaron las zonas por donde pasa la tubería y túnel en las diferentes rutas propuestas, así como los terrenos de llegada/entrega del agua en la periferia de la ciudad de San José.

Los píxeles del DEM son relativamente grandes, de aproximadamente 20 x 20 m, y su exactitud ronda los  $\pm 10$  m en elevación. La precisión que arroja no es apta para obras de ingeniería que exigen valores al centímetro y en algunas ocasiones al milímetro. Tal es el caso de las represas que requieren control geodésico (precisión milimétrica) o los canales y tuberías que exigen, al menos, valores cercanos al centímetro. Sin embargo, por tratarse de una investigación exploratoria, se considera que la precisión de este DEM es suficiente para alcanzar los objetivos propuestos.

El trazado más favorable de las rutas propuestas se realizó utilizando como insumo principal el DEM.

En la región urbana por donde pasarían las tuberías enterradas, el uso del suelo es heterogéneo dado el aumento de la población en estas zonas y las diferentes actividades que ahí se desarrollan. En la subcuenca del Río Patria persiste la zona boscosa, zona de reserva y parque nacional.

Adicionalmente, se efectuó un análisis fotogramétrico visual de la cobertura, recurriendo a las ortofotos oficializadas por el Instituto Geográfico Nacional, a escala 1:1000 con fechas del año 2005; además de un análisis complementario que centra su atención en las nuevas edificaciones, con imágenes satelitales más actualizadas provistas por el sistema en línea de Google Earth.

Tal como se ha dicho anteriormente, las coordenadas de los puntos de interés se obtuvieron a partir del DEM que representa el levantamiento topográfico de la zona. A partir de esta información, se realizaron los dibujos correspondientes acotados con todos los elementos de información como: longitudes de las rutas, longitudes de las tuberías, portal de entrada y salida de túneles, pasos sobre ríos, centros de población y detalles. Además, se generaron los alineamientos de cada ruta con sus respectivos estacionamientos, y a partir de éstos, se elaboraron los perfiles de donde se extraen las pendientes y las coberturas máximas.

### 3.4.2 Diseño de las rutas

A través del programa ArcGis se elaboraron los factores geométricos del diseño de las rutas que se abastecen del primer punto de toma de agua; tanto en planta como en perfil. Los múltiples trazados de prueba fueron hechos mediante polilíneas en tercera dimensión ajustadas al DEM, en el programa ArcGis y con la herramienta “interpolar líneas-crear líneas 3d”.

Para definir las coordenadas finales de los túneles, se proyectó un abanico de vectores. Estos vectores se extendieron a partir del punto de toma, utilizando inicialmente pendientes de entre -0,3 % y -0,4 %, y una dirección desde el noreste hacia el suroeste.

Todos los vectores, dadas las condiciones impuestas de pendiente y dirección, afloraron en la cuenca del Río Virilla. Luego, de la gama de vectores, se escogieron los que cumplieron de forma óptima con los requerimientos buscados, es decir, la menor elevación posible que permitiera trasvasar el agua por gravedad, estar a la distancia más cercana posible de la ciudad de San José, y llegar a en sitios despejados de construcciones.

En los vectores escogidos, se determinó el punto en el eje X (distancia) que intersecara al perfil del terreno (obtenido del DEM), definiéndose así puntos específicos con valores de coordenadas tanto en horizontal (Este y Norte) como en vertical (elevación), asignadas mediante la proyección CRTM05, y que corresponden a los portales de salida de cada uno de los túneles.

A los segmentos orientados que resultaron de este ejercicio, se les generó el perfil topográfico, utilizando el DEM y la herramienta “create-profile” del programa ArcGis. La pendiente para cada caso fue calculada de acuerdo con la relación entre la diferencia de elevación entre el sitio de toma y el sitio escogido para el afloramiento de los túneles, y la distancia total.

Para los alcances de esta investigación, se consideraron túneles rectilíneos y no se ahonda en características ingenieriles de la estructura ni aspectos geomorfológicos, fallas o cargas que puedan soportar.

Para los tramos de la tubería enterrada posterior a los portales de salida de los túneles, se analizó principalmente el uso del terreno, considerando que los sitios propuestos de entrega del caudal trasvasado se encontraran libres de edificaciones, además de converger en áreas planas sin pendientes pronunciadas o cañones de ríos y quebradas.

Para las rutas que se abastecen del segundo punto de toma de agua, se procedió a generar un archivo con curvas de nivel a cada 2 m en ArcGIS, a partir del DEM creado tomando como referencia las curvas de nivel de las hojas cartográficas del país. Este archivo fue posteriormente exportado a AutoCAD Civil 3D para generar una superficie topográfica de la zona, a la cual, se le definió una superficie de corte con las elevaciones del punto de toma y el punto de desvío (un punto intermedio de la línea de la ruta, en donde la tubería iniciaría su ubicación a orilla de calle). Con esto, se extrajo el contorno de la intersección entre ambas superficies, que corresponde con el tramo inicial de la ruta propuesta, y que continúa posteriormente por calle pública hasta el sitio de llegada.

Al utilizar este contorno, se garantiza mantener una pendiente descendente constante entre la toma y el punto de desvío. A partir del punto de desvío, la pendiente de la tubería cambia, coincidiendo con la pendiente de la ruta vial.

El sitio de toma y el trazado propuesto evitan cualquier cruce por la falla geológica activa presente en el Cerro Zurquí, cuya ubicación se muestra en el Mapa de Amenazas Naturales Potenciales de la Ciudad de Heredia y Alrededores (Comisión Nacional de Emergencias, 2000). También evita atravesar poblados antes del punto de desvío.

### **3.4.3 Variables de las rutas de trasvase**

Las rutas son las unidades de análisis. Cada una de ellas está caracterizada a través de una serie de variables, que son los atributos que las definen. Pueden adquirir diversos valores, y son propiedades sujetas a medición.

Una vez definidos los trayectos, las rutas se caracterizaron a través de sus variables, con lo que se logró describirlas de manera cuantitativa y se obtuvo con ello un análisis comparativo.

Se asignó un puntaje a cada una de las variables, el cual se establece de acuerdo con las ventajas o desventajas sociales, económicas, geométricas y topográficas que podrían brindar.

En el cuadro siguiente se enlistan las variables ponderadas y su puntaje asignado.

Cuadro 4. Variables ponderadas y su puntaje asignado

<b>Variables</b>	<b>Puntaje (Escala)</b>	<b>Criterios</b>
Elevación del punto de toma	De 1 a 20	A mayor elevación, mayor puntaje
Caudal	De 1 a 18	A mayor caudal, mayor puntaje
Longitud del túnel	De 1 a 15	A menor longitud, mayor puntaje
Longitud de tubería enterrada	De 1 a 13	A menor longitud, mayor puntaje
Elevación de la llegada de la ruta	De 1 a 11	A mayor elevación, mayor puntaje
Afectación a ciudades	De 1 a 9	A menor afectación, mayor puntaje
Pendiente promedio de la ruta	De 1 a 7	A mayor pendiente, mayor puntaje
Cobertura máxima del túnel	De 1 a 7	A menor cobertura, mayor puntaje
<b>TOTAL</b>	<b>100</b>	

Donde se han aplicado los siguientes criterios de calificación:

- La elevación del punto de toma se considera la variable más importante ya que es la que permite obtener más opciones de rutas para trasiego de agua por gravedad, propiciando una mayor pendiente y una mayor elevación de llegada de la ruta; lo cual es más favorable a la hora de la distribución del agua.
- El caudal es primordial para que el proyecto a desarrollar sea factible en cuanto al déficit de agua a satisfacer. Se coloca en segundo lugar porque, aunque se tenga un buen caudal, si no hay una suficiente elevación no se puede diseñar una ruta de trasiego de agua por gravedad.
- Una menor longitud de túnel se considera más adecuada ya que reduce el costo del proyecto y facilita la construcción del mismo. La realización de un túnel debe considerar como mínimo la geología del trazado, las condiciones de agua subterráneas y la sectorización geotectónica, lo que implica una mayor dificultad en el proyecto.
- Una menor longitud de tubería enterrada disminuye el costo del proyecto ya que se utiliza una menor cantidad de materiales. Además, se reduce la necesidad de constituir servidumbres de paso y tuberías, así como la afectación a calles públicas de alto flujo vehicular.

- Entre mayor sea la elevación del punto de llegada de la ruta, se podrá distribuir mejor el agua a una mayor cantidad de población, sin la necesidad de bombeo.
- La afectación a ciudades será mayor en los cascos centrales de población, en las carreteras de alto flujo vehicular y según el uso del suelo. Si el uso es agrícola o ganadera su afectación es muy diferente a si el uso es habitacional, comercial o industrial; siendo más costosa en el último de los casos. La afectación a ciudades se da para el caso de tubería enterrada, pero no se considera en el caso de los túneles dada la profundidad de estos.
- La pendiente favorece el flujo del agua que se desea transportar, esto porque la pendiente es directamente proporcional al caudal. Además, favorece a que el arrastre de sedimentos sea más eficiente y no se acumulen en la conducción.
- Entre menor cobertura sobre un túnel hay mayor facilidad para realizar estudios previos para su diseño, además de que se facilita su construcción.

Para el cálculo de los puntajes asignados, se otorgó el mayor o menor puntaje según el mayor o menor valor de la variable correspondiente, de acuerdo con el criterio definido, sea directa o inversamente proporcional (Ver *Anexo 7*). Para los valores intermedios se realizó una interpolación lineal.

Las variables de coordenadas y elevaciones intermedias de las rutas no se consideraron para la aplicación de puntajes, ya que por su naturaleza no aportan beneficios o desventajas para las rutas.

Posteriormente, se realizó un promedio ponderado de los valores obtenidos para cada ruta. El valor más alto representa la ruta más favorable.

### **3.5 Muestreo de calidad del agua**

Se tomaron tres muestras de agua de tipo integradas para ser llevadas a laboratorio, correspondiendo una a cada tercio del ancho del espejo de agua, es decir a margen derecha, centro y margen izquierda.

La toma se hizo de manera manual, con inmersión a partir de la superficie hasta el fondo y con llenado total del recipiente de plástico, de un litro de capacidad. Estos recipientes fueron esterilizados previamente y sellados, después del llenado.

Las muestras fueron transportadas en hielo hasta el Laboratorio Químico Lambda y el Laboratorio de Ambiental de la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad de Costa Rica, de donde se obtuvo los resultados que se detallan más adelante.

## CAPITULO 4. CARACTERIZACIÓN DE LA SUBCUENCA DEL RÍO PATRIA

Para poder dar un panorama general de la zona de estudio en la que se localiza la subcuenca del Río Patria, se procedió a realizar una caracterización de la misma, en la que se incluyen parámetros morfológicos, de relieve, además de características geológicas, uso y cobertura de suelo, y una descripción climática.

### 4.1 Características morfológicas

#### 4.1.1 Parámetros de forma

Mediante la utilización del programa ArcGis se obtuvieron los parámetros geométricos que presenta la subcuenca del Río Patria, estos datos se encuentran en el *Cuadro 5*.

Cuadro 5. Parámetros geométricos de la subcuenca del Río Patria

Parámetro	Resultado
Área	20.37 km <sup>2</sup>
Perímetro	23.46 km
Longitud de cauce principal	8.27 km
Longitud de cauces secundarios	11.38 km
Longitud total de cauces	19.65 km
Índice de compacidad $I_G$	1.47
Índice de forma $K_f$	0.30

A partir de los resultados obtenidos, se puede describir la forma de la subcuenca del Río Patria, y se observa que el índice de compacidad (1.47) obtenido refleja que la subcuenca en estudio no es circular, ni posee una forma regular ni compacta, además el índice de forma confirma que su geometría es alargada, debido a que el valor obtenido de  $K_f$  da menor que uno. Este parámetro define la interacción de los eventos de precipitación con la superficie terrestre y tiene influencia sobre los patrones de drenaje y la velocidad del flujo hacia los cauces, debido a que afecta fuertemente la respuesta hidrológica en la subcuenca en estudio.

#### 4.1.2 Características de relieve

Para la subcuenca del Río Patria se desarrolló un modelo de elevación digital (DEM), el cual se puede observar en el Anexo 4a, en el mismo se refleja que la subcuenca

presenta un amplio rango de elevaciones que va desde los 1183 msnm hasta 2520 msnm, con laderas que alcanzan pendientes hasta de 72 %, estos parámetros se muestran en el siguiente cuadro, además, se puede observar la distribución de pendientes de la cuenca de manera espacial en el Anexo 4b.

Cuadro 6. Parámetros de relieve de la subcuenca del Río Patria

<b>Parámetro</b>	<b>Resultado</b>
Elevación máxima	2520 msnm
Elevación mínima	1183 msnm
Elevación media	1885 msnm
Pendiente máxima	72 %
Pendiente mínima	0 %
Pendiente media	21 %

El siguiente cuadro permite calcular los porcentajes de área total y acumulada por rango de elevación de la subcuenca del Río Patria, a partir de los cuales se puede obtener la curva hipsométrica de la cuenca y el histograma de frecuencias altimétricas.

Cuadro 7. Porcentajes de área total y acumulada por rango de elevación de la subcuenca del Río Patria

<b>Elevación (msnm)</b>	<b>Área entre curvas (Km<sup>2</sup>)</b>	<b>% Área<sub>total</sub></b>	<b>% Área acumulado</b>
1183-1200	0.012	0.06 %	100.00 %
1200-1300	0.316	1.55 %	99.94 %
1300-1400	0.739	3.63 %	98.39 %
1400-1500	1.539	7.56 %	94.76 %
1500-1600	1.822	8.95 %	87.20 %
1600-1700	1.567	7.70 %	78.25 %
1700-1800	2.265	11.13 %	70.55 %
1800-1900	1.965	9.65 %	59.42 %
1900-2000	1.768	8.69 %	49.77 %
2000-2100	2.032	9.98 %	41.09 %
2100-2200	2.916	14.33 %	31.10 %
2200-2300	2.341	11.50 %	16.78 %
2300-2400	0.883	4.34 %	5.28 %
2400-2500	0.185	0.91 %	0.94 %
2500-2600	0.006	0.03 %	0.03 %
$\Sigma$	20.36		

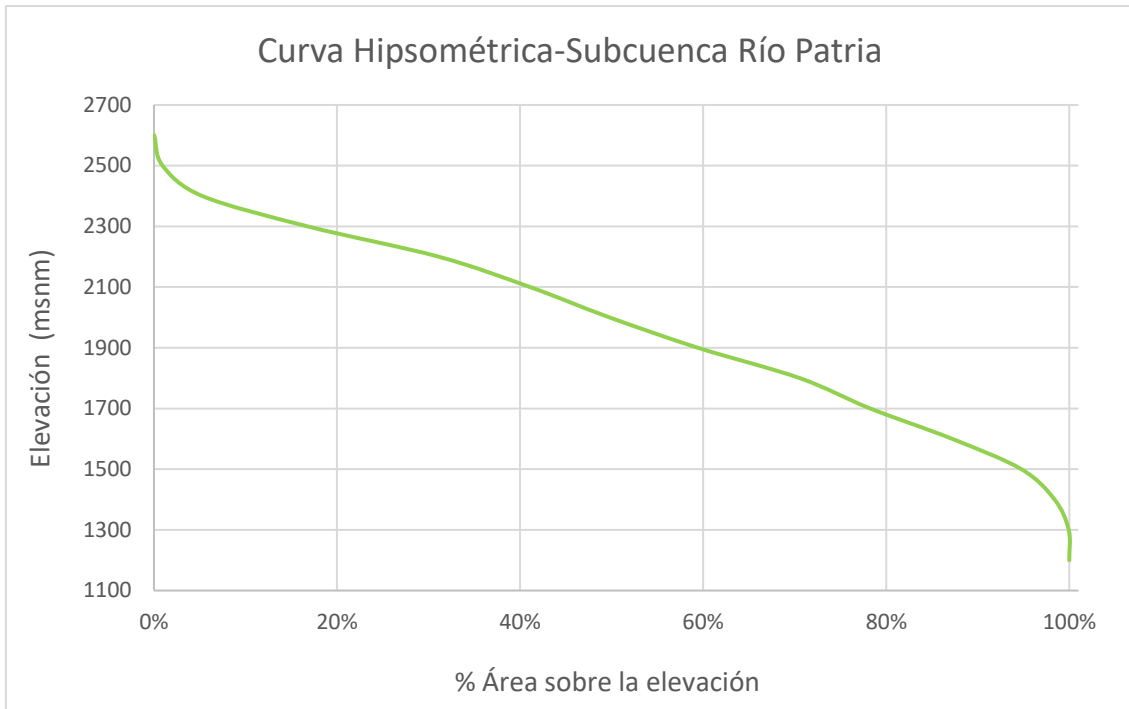


Figura 8. Curva hipsométrica de la subcuenca del Río Patria

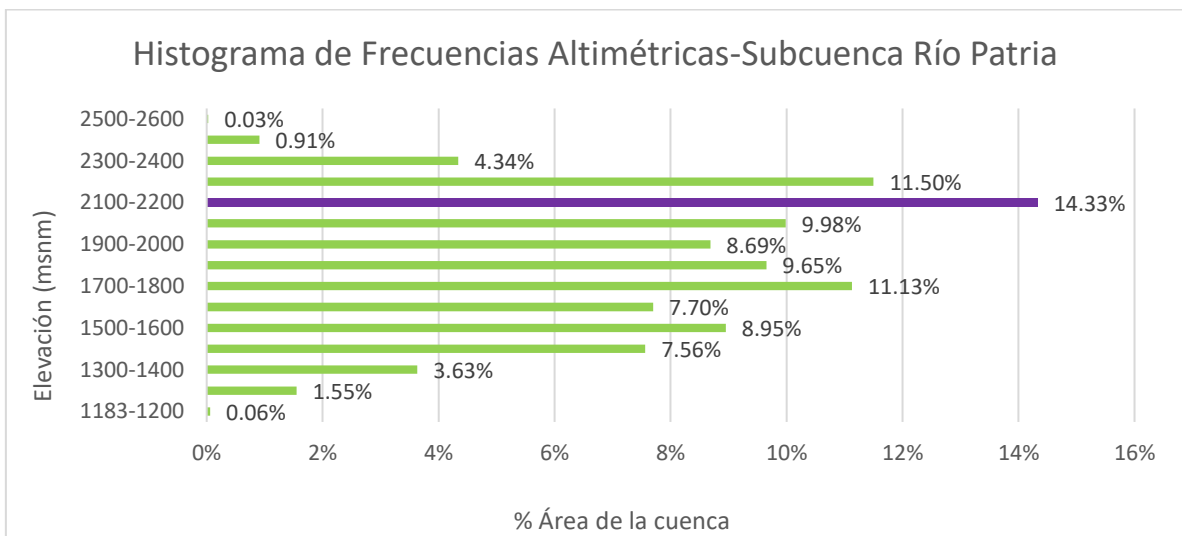


Figura 9. Histograma de frecuencias altimétricas de la subcuenca del Río Patria

La curva hipsométrica de la subcuenca del Río Patria indica el estado de desarrollo de la cuenca. El gráfico representa que esta se encuentra en un estado en equilibrio, es decir, se considera una subcuenca en fase de madurez sobre el desarrollo geomorfológico de la misma.

Por otro lado, el histograma de frecuencias altimétricas, muestra que el mayor porcentaje de área de la subcuenca se encuentra entre las elevaciones 2100 y 2200, este valor se representa en morado en el histograma.

### 4.1.3 Parámetros de la red de drenaje

El número de orden de los cauces es determinado mediante las leyes de Strahler, explicadas previamente en el marco teórico. El Anexo 4c muestra gráficamente el valor correspondiente del número de orden para cada uno de los cauces de la cuenca en estudio, así como su patrón de drenaje. Se puede observar en el Cuadro 8, además, el número de orden de la subcuenca con su respectiva longitud, así como el Cuadro 9 refleja la cantidad de cauces y razón de bifurcación asociada.

Cabe resaltar que el número de orden de Strahler, para la subcuenca del Río Patria es igual a 3, este resultado muestra cuán ramificada es la red de drenaje.

Cuadro 8. Longitud de los cauces de la subcuenca del Río Patria, con su respectivo número de orden.

Identificador	Longitud (km)	Clasificación	# Orden
1	3.36	Cauce secundario	1
2	4.73	Cauce principal	1
3	1.61	Cauce principal	2
4	1.00	Cauce secundario	1
5	0.75	Cauce secundario	1
6	1.75	Cauce secundario	2
7	1.93	Cauce principal	3
8	1.88	Cauce secundario	1
9	1.75	Cauce secundario	1
10	0.88	Cauce secundario	2
Total cauce Principal (km)	8.27	Total cauces secundarios (km)	11.38

Cuadro 9. Número de orden y razón de bifurcación de la subcuenca del Río Patria

Orden i	Cantidad de cauces $N_i$	Razón de bifurcación $r_b$
1	6	2.4
2	3	3.0
3	1	1.0

Por otro lado, la subcuenca del Río Patria presenta una densidad de drenaje de 0.957, dicho parámetro representa una medida de la homogeneidad de distribución de la red, haciendo referencia a la cobertura que tiene la totalidad de los cauces sobre la superficie de la subcuenca, está controlado por las características litológicas de la subcuenca en sí y estructurales de los materiales, por el tipo y densidad de vegetación y por factores climáticos.

El resultado obtenido no corresponde a un valor alto, ya que no se encuentra por encima ni siquiera de uno, debido a que las mayores densidades de drenaje se encuentran en rocas blandas de baja permeabilidad y en regiones con escasa cobertura vegetal, las cuales no están presentes en la subcuenca en estudio.

Acerca de la forma de los cauces principales, se logra observar que la subcuenca en estudio presenta un patrón de drenaje dendrítico, característico de los ríos que cubren el territorio nacional. Además, esto nos indica que el tipo de roca que se presenta es resistente a la erosión, impermeable y lisa (Farfán, Urbina, Ferreira y Brandan, 2010).

## **4.2 Características geológicas y pedológicas**

### **4.2.1 Condiciones geológicas**

De acuerdo con el Plan de Manejo del Parque Nacional Braulio Carrillo, las coberturas vegetales están estrechamente relacionadas con los estratos y texturas que componen los suelos y las capas inferiores al subsuelo que establecen las condiciones físicas que conforman las características del área de estudio (AE).

Geológicamente, el AE pertenece a la formación Cordillera Volcánica Central, de hace un millón de años (período cuaternario), lo cual indica que las formaciones y rocas volcánicas denominados lavas de intracañón, lavas ignimbritas y lavas de post-avalancha, no están muy descompuestas por la erosión natural, y se explica además por la presencia de conos volcánicos. Se encuentra dentro de dos formaciones volcánicas; la formación Barva y la formación Irazú, las cuales la separa el Río Patria.

Según la localización dentro del mapa geológico de Costa Rica (1982), escala 1/200.000, elaborado por los geólogos Luis Felipe Sandoval M., Rodrigo Sáenz Ruiz et al, el AE se encuentra dentro de la Zona Qv2, que describe formaciones volcánicas recientes y actuales, piroclásticos asociados, materiales volcánicos, lavas, tobas y piroclastos, sin embargo, en el más reciente mapa geológico desarrollado para el país el AE, se clasifica como rocas ígneas, originadas del vulcanismo del pleistoceno, esto se puede observar en el Anexo 4d.

La topografía y geomorfología del Área de Conservación Cordillera Volcánica Central (ACCVC), donde se localiza el AE, se caracteriza por la presencia de tres rasgos fisiográficos sobresalientes que corresponden a la Depresión Tectovolcánica Central (Valle Central), la Cordillera Volcánica Central y las Llanuras del Norte, sin embargo, para interés de esta investigación, se describe únicamente las primeras dos.

a) La Depresión Tectovolcánica Central (Valle Central): Está conformada por depósitos de materiales de origen volcánico denominados lavas de intracañón, lavas ignimbritas y lavas de post-avalancha.

b) La Cordillera Volcánica Central: Es una de las zonas de vulcanismo más activas de América, ocupa la parte central del país con orientación Noreste-Sureste. La formación de la Cordillera ocurrió en la última fase de la historia tectónica de Costa Rica; la post-orogénica de hace aproximadamente un millón de años. Se configuró en el cuaternario y en ella sobresalen los macizos de los Volcanes Irazú (3.432 msnm), Turrialba (3.329 msnm), Barva (2.906 msnm), Poás (2.704 msnm), Cacho Negro (2.136 msnm) y el Congo (2.014 msnm). (MINAE, SINAC & ACCVC, 2005)

#### 4.2.2 Tipos de suelo

En relación con los suelos, el AE se encuentra dentro del PNBC, la mayor parte del área protegida está cubierta por un bosque primario, predomina el tipo de suelo andisol (Ver Anexo 4e) o suelos derivados de materiales volcánicos, son suelos jóvenes derivados de cenizas volcánicas. Su principal característica es la presencia de pseudo arcillas como la alófana y la hessingerita, con altos porcentajes de Fe y Al en oxalato ácido y alta retención de fósforo y muy baja densidad aparente, en Costa Rica este orden de suelo corresponde a aproximadamente 7633,69 km<sup>2</sup> lo que equivale a un 15,11 % del territorio nacional (MINAE, SINAC & ACCVC, 2005).



Figura 10. Fotografía de la matriz del suelo en subcuenca del Río Patria  
Tomada por: Msc. Oscar Gómez Vega, 2017.

La arcilla dominante es la alofana que es un coloide de características muy particulares, amorfas e hidratadas, que aparece en esos sistemas como producto obligatorio de la descomposición de las cenizas volcánicas en zonas húmedas. La alofana es una arcilla inestable, o sea, muy reactiva, de modo que imprime comportamientos peculiares a estos suelos.

El color oscuro de los andisoles se asocia a contenidos elevados de alofana mientras que los colores pardos amarillentos están relacionados con altas concentraciones de haloisita. En el caso de andisoles de colores pardo rojizos es común encontrar caolinitas.

Debido a la presencia de altos contenidos de compuestos organominerales estables, especialmente en el horizonte superficial, los andisoles resultan ser suelos muy bien estructurados que propician el buen drenaje, pero a su vez, presentan una buena retención de humedad y baja densidad aparente con baja resistencia al corte tangencial.

En partes cercanas al volcán Barva, estos suelos son de textura franco arenosa o más gruesa, mientras que en las posiciones intermedias del relieve presentan texturas francolimosas, y en las partes inferiores presentan texturas arcillosas, particularmente, esta característica afecta notoriamente la disponibilidad de nutrimentos, dado que la fijación de algunos de ellos es más tenaz conforme la textura se hace más fina.

Es importante destacar que las cenizas recién depositadas y los suelos volcánicos en sus primeros estados de desarrollo son bastante susceptibles a la erosión hídrica y, si a esto se agregan las fuerzas de las pendientes que son propias de una fisiografía de montaña, se corre el riesgo de erosionarlos muy rápidamente, lo cual, a pesar de su buena profundidad efectiva, puede causar problemas de pérdida de potencial.

#### **4.2.3 Geomorfología**

Según la localización dentro del mapa Geomorfológico de Costa Rica (1980), escala 1/200.000, elaborado por el Msc Rodolfo Madrigal G. y la Lic. Elena Rojas Ch., el AE se encuentra dentro de la Zona 2.25, Volcán Barva. La cual se describe a partir de los siguientes rubros:

a) Morfografía: describe un macizo que se extiende en una dirección norte-sur, la cima del volcán está completamente ubicada hacia el sur de toda la unidad, sus laderas tienen pendientes muy variadas pero la zona correspondiente a la subcuenca del Río Patria muestra una dominancia de pendientes que varían entre 21° a 72°, el Río Patria es el límite con el macizo del volcán Irazú.

b) Tipo de Roca: Las lavas con mayor edad de la zona 2.25 Volcán Barva, tienen una tendencia a ser basálticas, mientras que las más recientes se presentan más andesíticas. Hay todo tipo de rocas volcánicas como lavas aglomeradas, piroclastos.

c) Morfogénesis: La forma del macizo del Barva, según el Mapa de Geomorfología de Costa Rica, caracteriza la zona de estudio de esta investigación, se debe en su mayoría a la actividad volcánica. En el área correspondiente a las subcuencas de los ríos Patria y General, se observa un escarpe con alturas de 100 a 300 metros, y pendientes de hasta 72°. Es probable que este escarpe se deba a un colapso de la zona a consecuencia del vacío interno dejado por la gran cantidad de materia producida por el volcán Barva durante sus periodos de actividad.

d) Morfocronología: La edad de esta unidad es del Plioceno-Pleistoceno.

### **4.3 Uso y cobertura del suelo**

#### **4.3.1 Cobertura del suelo**

La cobertura de la subcuenca bajo estudio es, en su totalidad, vegetal, tal como se observa en el Anexo 4f. La cobertura vegetal se puede definir como la capa de vegetación natural que cubre la superficie terrestre, comprendiendo una amplia gama de biomasas con diferentes características fisionómicas y ambientales. En el caso de la zona de estudio, corresponde a áreas cubiertas por bosques naturales.

En las subcuencas hidrográficas, en general, es posible encontrar diversos tipos de vegetación, definidos en cierto grado por parámetros físico ambientales, biológicos y edáficos, sin embargo, para el caso de la subcuenca del Río Patria, la vegetación predominante es la forestal, característica de un bosque siempre verde de gran densidad y complejidad florística.

La mayor parte de la subcuenca está cubierta por bosque primario, en el que existen alrededor de 6.000 especies de plantas.

Son relativamente abundantes especies como manú, caoba, roble, caobilla y gavián. También, se encuentran: botarrama, ceiba, yos, lorito, jícaro y ojoche. Algunas especies que se encuentran en peligro de extinción, como lo son el nazareno y la súrtuba, son características de la zona.

En las partes altas se encuentra bosque montano húmedo y bosque lluvioso montano bajo, según la clasificación de Zonas de Vida de Holdridge. En estas zonas se encuentran varias especies, como cedro, jorco, magnolia, aguacatillo, roble encino,

entre otras, acompañados por gran cantidad de hierbas, arbustos y pequeños árboles que se ubican en el sotobosque.

La casi nula alteración de la masa forestal en la subcuenca del Río Patria hace que la cantidad de agua disponible se vea poco afectada, provocando que sus caudales no muestren aumentos ni disminuciones significativos, ya que las pérdidas debidas a evapotranspiración son altas pero equilibradas por la retención debido a raíces.

Lo anterior quiere decir que, al mantenerse sin variaciones la cobertura forestal de la zona, la velocidad del agua de escorrentía se mantiene también invariable y los caudales máximos no aumentan. En estas condiciones, los caudales de estiaje o caudales base, tienen alta probabilidad de aumentar (Brenes & González, 1993).

#### **4.3.2 Zonas de vida y áreas silvestres protegidas**

En la zona de la subcuenca del Río Patria, se encuentran bosques que pertenecen a las zonas de vida Bosque pluvial premontano (bp-P) y Bosque pluvial Montano Bajo (bp-MB), según la clasificación de Holdridge, tal como se observa en el Anexo 4g.

La subcuenca en estudio como tal tiene dentro de su perímetro cuatro diferentes áreas silvestres protegidas, la primera de ella y que corresponde a una mayor magnitud es la Cordillera Volcánica Central, seguida de esta se encuentra el Parque Nacional Braulio Carrillo, y en menor parte posee dos sitios de índole privado que son el Refugio de Vida Silvestre Cerro Dantas, único que se encuentra en su totalidad dentro de la subcuenca del Río Patria, y el Refugio Nacional de Vida Silvestre Jaguarundi (Ver Anexo 4h).

Este aspecto incide en que el área de la subcuenca cuente con gran diversidad de especies de flora y fauna, incluyendo especies migratorias vertebradas e invertebradas que se protegen en la zona.

La topografía abrupta de la zona dificulta el acceso para extraer flora y fauna, lo que ayuda a la conservación de los recursos en algunos sectores. Además, esta produce quebradas y ríos de corriente rápida, conformando un hábitat ideal para algunas especies de fauna.

La vegetación es la fuente que determina la biodiversidad animal de un área dada. En particular la del Parque Braulio Carrillo, es extremadamente rica.

El Parque Nacional Braulio Carrillo representa en el contexto de la Cordillera Volcánica Central, una de las áreas silvestres protegidas de mayor importancia. Lo anterior fundamentado en las siguientes características:

- Una extensión territorial importante de 47.586 hectáreas.
- La presencia de varios edificios volcánicos.
- Una variabilidad de microclimas, con seis zonas de vida. y una precipitación pluvial que va de los 2.000 mm hasta los 5.734 mm anuales.
- Una riqueza en biodiversidad, con 6.000 especies de plantas, 95 de anfibios, 123 de reptiles, 550 de aves y 169 de mamíferos.
- La presencia de múltiples quebradas y ríos que forman tres subcuencas hidrográficas importantes del país.
- Una variedad altitudinal, que va de los 32 msnm., hasta los 2.906 msnm.
- El Parque favorece la conectividad entre varias áreas protegidas, formando un bloque boscoso en la Cordillera de aproximadamente 115.000 hectáreas.
- Es el parque nacional más cercano a los principales centros de población del país, como son San José y Heredia.

#### **4.4 Características climáticas**

##### **4.4.1 Precipitación**

La ubicación de la subcuenca alta del Río Patria es, en términos macro, una zona meramente tropical, con las características climáticas intrínsecas a dicha región. Allí, en las zonas tropicales, las masas de aire que ascienden generalmente son cálidas y con alto contenido de humedad produciendo con frecuencia copiosas lluvias.

Según enuncia Heuveldop, Pardo, Quirós y Espinoza (1986), las grandes acumulaciones de precipitación se deben a una serie de factores, siendo el más importante de éstos que la zona de convergencia intertropical permanece en estas regiones durante la mayor parte del año. La zona de convergencia intertropical está asociada a bajas presiones que ocasionan masas de aire ascendente, y luego estas, al condensarse, producen precipitaciones. Además, para la zona en particular, una circunstancia crucial que se asocia a las altas cantidades de lluvia caída, es el ascenso orográfico, especialmente cuando los vientos alisios chocan contra la barrera montañosa.

En el Anexo 4i se puede notar que conforme se avanza hacia el oeste (aumenta la elevación sobre el nivel del mar), la precipitación tiende a disminuir. La subcuenca en estudio se ubica entre alturas medias que van desde los 1183 msnm. hasta los 2200 msnm., evidenciando que existe una propensión a la disminución de los montos promedio de precipitación conforme se aumenta en altura. Esta circunstancia es

inherente a las zonas tropicales. Heuveldop et al., también aporta que la frecuencia de la incidencia de la precipitación viene dada por el número de días lluvia (más de un milímetro durante 24 horas). El número de días lluvia tiende a aumentar a partir de los 1500 metros de altura, pero la cantidad de agua que cae en forma de lluvia se reduce, lo cual hace que la precipitación total anual sea cada vez menor a partir de esa altura.

Los vientos alisios son de relevante importancia con respecto a la precipitación que se recibe en la subcuenca del Río Patria. Para Meléndez (2015), los alisios del noreste se caracterizan por ser constantes durante todo el año e ingresan al país con fuerza de diciembre a marzo. Son vientos frescos y húmedos que entre enero y febrero aumentan, intensificando las lluvias en la fachada del Caribe costarricense y parte de la Zona Norte. Estos vientos vienen cargados de humedad al recorrer el Océano Atlántico y el Mar Caribe, y al encontrarse con el sistema montañoso de la Cordillera de Talamanca y la Cordillera Volcánica Central depositan su humedad y pasan como vientos secos hacia el lado de sotavento (Meléndez Carranza, 2015).

La subcuenca del Río Patria, ubicada en la vertiente del Caribe, presenta una estación lluviosa casi permanente durante el año y una alta humedad relativa. Esta vertiente es la más húmeda, por su posición en sotavento, caso contrario a la Vertiente del Pacífico.

La UNESCO (2007) recalca que, según su distribución temporal de precipitación, la vertiente del Caribe no muestra una estación seca definida, siendo únicamente los meses de menor precipitación marzo y setiembre, lo cual coincide con las características de la subcuenca en estudio. En la región costera la máxima precipitación se registra durante el mes de julio con otro máximo secundario durante el mes de diciembre. La región montañosa intermedia, expuesta directamente al flujo del noreste, se caracteriza por tener una mayor pluviosidad durante todos los meses del año.

Cerca del área de estudio se encuentran diversas estaciones de precipitación, entre ellas se encuentra la estación Cerro Zurquí, La Montura, Los Cartagos, y Monte de la Cruz administradas por el Instituto Costarricense de Electricidad y Senara, respectivamente, tal como se muestra en la siguiente figura, sin embargo, cabe resaltar que la subcuenca del Río Patria, no posee dentro de su área ninguna estación meteorológica.

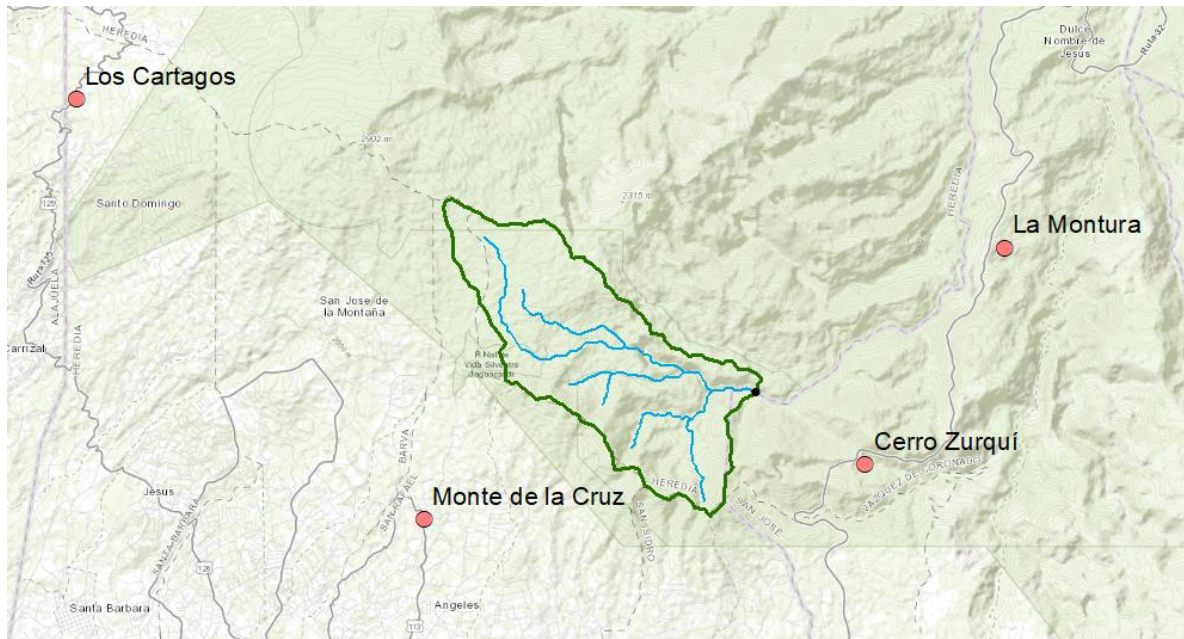


Figura 11. Estaciones meteorológicas cercanas en la subcuenca del Río Patria

Debido a que la subcuenca no presenta ninguna estación meteorológica, se procede a realizar dos clasificaciones para poder determinar cuál es su precipitación media anual aproximadamente en la zona en estudio. Las clasificaciones son las siguientes:

- a. Según las zonas de vida de Holdridge, como se comentó anteriormente, la subcuenca tiene un porcentaje de área que corresponde a Bosque Pluvial Montano Bajo, este bosque describe una precipitación promedio anual que ronda entre los 4000 mm hasta los 8000 mm, por otro lado, el restante porcentaje de área de la subcuenca corresponde a Bosque Pluvial Premontano, el cual caracteriza la zona con el mismo promedio de precipitación promedio anual.
- b. Por el contrario, el Instituto Meteorológico Nacional, según la ubicación, la zona de estudio se encuentra en dos regiones climáticas, la Caribe Norte, y el Valle Central, sin embargo, más del 50 % de la subcuenca está en la Caribe Norte, por lo que cabe resaltar que esta zona describe una precipitación promedio anual de 3300 mm anuales con máximos de hasta 4500 mm anuales (Instituto Meteorológico Nacional & Comité Regional de Recursos Hidráulicos, 2008).

Por otro lado, si se realiza un análisis de cuál de las estaciones meteorológicas describe en mayor medida la subcuenca, se concluye que la estación Cerro Zurquí, es la más cercana y con una elevación de 1516 msnm, y además está dentro de la Región Caribe, caso contrario con las estaciones Monte de la Cruz y los Cartagos, las

cuales, se localizan del lado de la Vertiente Pacífica y la estación La Montura, que se halla en vertiente Caribe, posee una elevación de apenas 1146 msnm, por lo que no corresponde ni siquiera a la elevación mínima de la subcuenca. Siendo esto así, se realiza una tercera clasificación de precipitación promedio anual, con los datos de la estación Cerro Zurquí (Ver Anexo 3) y se obtiene 6977 mm de precipitación anual.

La subcuenca en estudio, según datos obtenidos en el ICE, entre los años 1983 al 2011, presenta una variación de precipitación mensual, tal y como se muestra en la Figura 12, en donde se tienen dos períodos lluviosos marcados, uno que va de setiembre hasta abril, y otra de abril hasta setiembre, siendo mayor el segundo período.

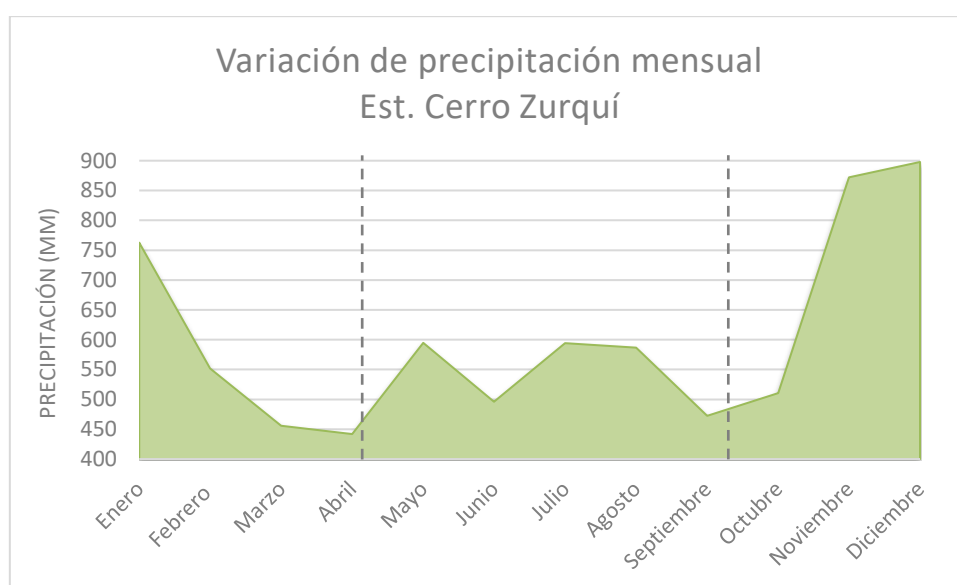


Figura 12. Gráfico de variación de precipitación mensual de la subcuenca del Río Patria

#### 4.4.2 Temperatura

De manera general, se entiende que, en la temperatura, indistintamente del lugar o región del planeta, lo único que cambiará serán los valores, ya que existen algunos factores del clima como la latitud, la continentalidad o la misma vegetación, entre otros, que la modificarán, dependiendo de las características geomorfológicas y de ubicación del área dentro del planeta tierra.

Es así como a partir de esta conceptualización en la subcuenca donde se localiza el estudio, que se presentan diferentes valores de temperatura en el transcurso de las épocas del año. La subcuenca que se ha delimitado presenta una temperatura máxima anual entre 18°C a 24°C, temperaturas mínimas que van desde los 14°C y descienden hasta el valor de 8°C, de ahí que se puede estimar que la zona de interés presenta

temperaturas medias anuales entre los valores de 12<sup>o</sup>C hasta 18<sup>o</sup>C, lo anteriormente descrito se puede observar en el Anexo 4j, el cual se realiza a partir del Atlas Climatológico del Instituto Meteorológico del 2010.

#### **4.4.3 Evapotranspiración**

La zona Caribe, en general, adolece de suficientes estaciones meteorológicas tipo B que brinden datos de los diversos factores climatológicos de las diferentes subregiones de esta parte de Costa Rica. Esta falencia de densidad de estaciones es notoria en las regiones altas de las Cordillera Central parte Caribe y en la montaña de Talamanca.

La zona de estudio de esta investigación, tal como se ha dicho, se ubica en la Cordillera Central Parte Caribe (CCPC), exactamente dentro del Parque Nacional Braulio Carrillo y no escapa a esa deficiencia de ausencia de estaciones meteorológicas tipo B, ni tan siquiera existe una tipo A o estación fluviográfica, por lo que no existen datos primarios de factores climatológicos ni de caudales dentro de la subcuenca en sí, sólo alrededor de esta.

Por lo anterior, el establecimiento de los índices de evaporación y de evapotranspiración que pudieran caracterizar la zona de estudio, no es posible de manera precisa por la carencia de datos esenciales de viento, temperaturas máximas y mínimas, radiación, medidas de evaporación directas (Tanque Tipo A) y otros elementos climáticos tal como el déficit de saturación de los suelos.

Para llenar estas carencias, ya señaladas por Ramírez en el año 1976, se han utilizado diversas fórmulas tales como la de Penman, Thornhwaite, Christiansen y Blaney y Cridle, que requieren siempre de retroalimentación de los datos ya citados que inciden en los fenómenos de la evaporación y la evapotranspiración y que, sin embargo, no todas estas fórmulas son aplicables a la generalidad de las condiciones y mucho menos a las condiciones de localidad de la zona de estudio.

La zona de estudio de esta investigación es realmente una zona prístina, resguardada inclusive por la normativa de parques nacionales del país, con severos controles para la investigación y donde no se permite ningún tipo de construcción ni alteración de las condiciones naturales (Ley No. 6084. Ley del Servicio de Parques Nacionales, 1977).

Por todo lo anterior, se debió recurrir a los resultados de investigaciones previas que han utilizado datos de algunas, muy escasas estaciones meteorológicas representativas de las diferentes zonas climáticas de Costa Rica y con ellas han

establecido los índices de evaporación y evapotranspiración para las diversas regiones del país.

Para efectos de esta investigación, se ha escogido, por la inclusión que hace de la subcuenca 12 del Río Sarapiquí donde se halla el Río Patria, el estudio de la UNESCO, para caracterizar esta subcuenca del Río Patria en lo relativo a la evaporación y evapotranspiración.

Los valores de Evaporación Real establecidos por el Instituto Meteorológico Nacional (IMN) citados por la UNESCO en el 2007 para las zonas altas del Caribe, rondan entre los 900-1100 mm, esto se puede observar en el Anexo 4k (Oficina Regional de Ciencia para América Latina y el Caribe de la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura, 2007)

Para la elaboración del mapa de evapotranspiración real del país, IMN utilizó 75 registros de estaciones climatológicas principales que contaban con registros de temperatura, humedad relativa, radiación, insolación y viento.

#### **4.4.4 Brillo solar**

Las horas de brillo solar en la subcuenca del Río Patria varían de acuerdo a la zona, sin embargo, tal como se puede observar en el Anexo 4l, sobre la subcuenca únicamente pasa la isolínea de 4h de brillo, pero también se observa en la cercanía de los límites de esta, las isolíneas de 5h y 3h. La de 5h se localiza al noroeste en la parte más alta de la subcuenca, pero con menores pendientes en las laderas, mientras que en su parte sureste se localiza la isolínea de 3h de brillo solar, esta zona se encuentra cerca de la Ruta 32 y en una parte de mayores pendientes y bosques más densos.

El conocimiento adecuado del régimen de brillo solar permite, estimar características cuantitativas de la nubosidad y radiación solar, de forma que se pueda tener una idea sobre la disponibilidad de luz del sol para el aprovechamiento de la energía solar en el país, en una actividad en específico, o bien para clasificar los tipos de bosque y vegetación en la subcuenca del Río Patria.

## CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 5.1 Ortomosaico y modelo digital de superficie (MDS)

A partir del procesamiento, se obtuvo un mosaico ortorectificado y georreferenciado (Figura 13) compuesto por 60 imágenes con una resolución espacial de 2.64 cm/píxel y que abarca un área de 16 000 m<sup>2</sup> alrededor del sitio de aforo.



Figura 13. Mosaico de imágenes, Río Patria, diciembre 2017

De la ortofoto obtenida se pudo tener un mayor criterio para el análisis visual que permitió verificar la cantidad de aportes que afectan el volumen del caudal en el sitio de aforo. Con esto, se constató que no existen aportes entre el sitio de aforo y el primer punto de toma de agua, por lo que las condiciones de caudal son prácticamente idénticas entre ambos puntos.

Con el análisis visual se pudo comparar el ancho del espejo de agua con respecto a los datos del levantamiento hidrográfico realizado, obteniéndose una mayor certeza de los datos. Se determinó que la cobertura corresponde a un área completamente boscosa.

A partir de las fotografías capturadas con el dron y los puntos de control (referencias) se generó un modelo digital de superficie (MDS), el cual se observa en la Figura 14. Este MDS describe las variaciones de elevación, representado mediante una gama de

colores. Las elevaciones van en un rango de 1175 a 1272 m, en la zona de aforo, tal como se muestra en la Figura 15.

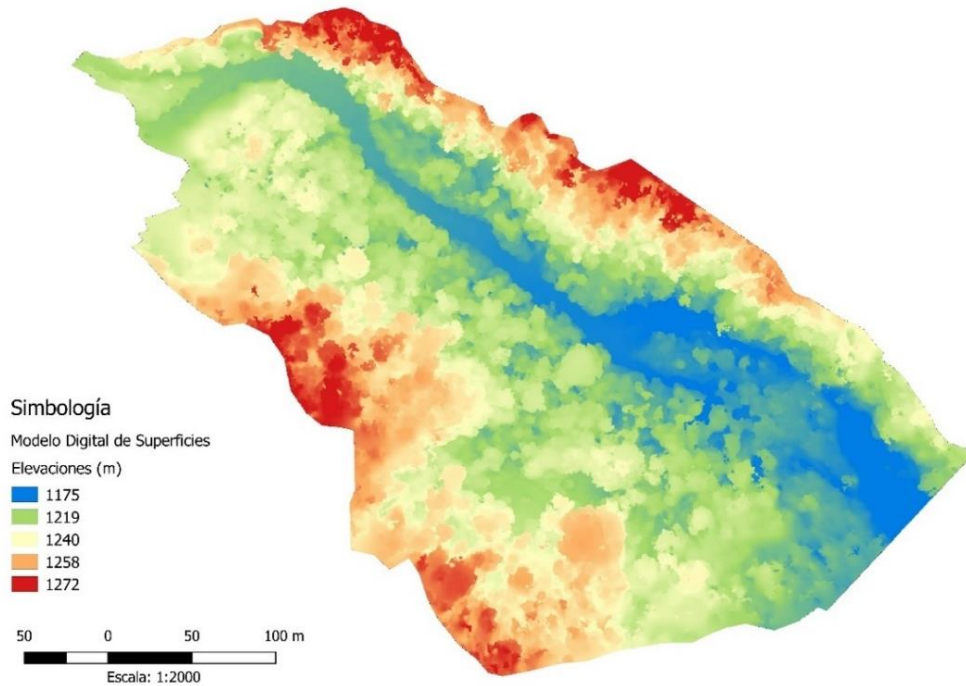


Figura 14. Modelo de Superficie (MDS), Río Patria, diciembre 2017.

El MDS generado es coincidente con la elevación de 1189.81 m y las coordenadas CRTM05 Este: 497646.264, Norte: 114806.056, medidas mediante tecnología GNSS en el sitio de aforo.

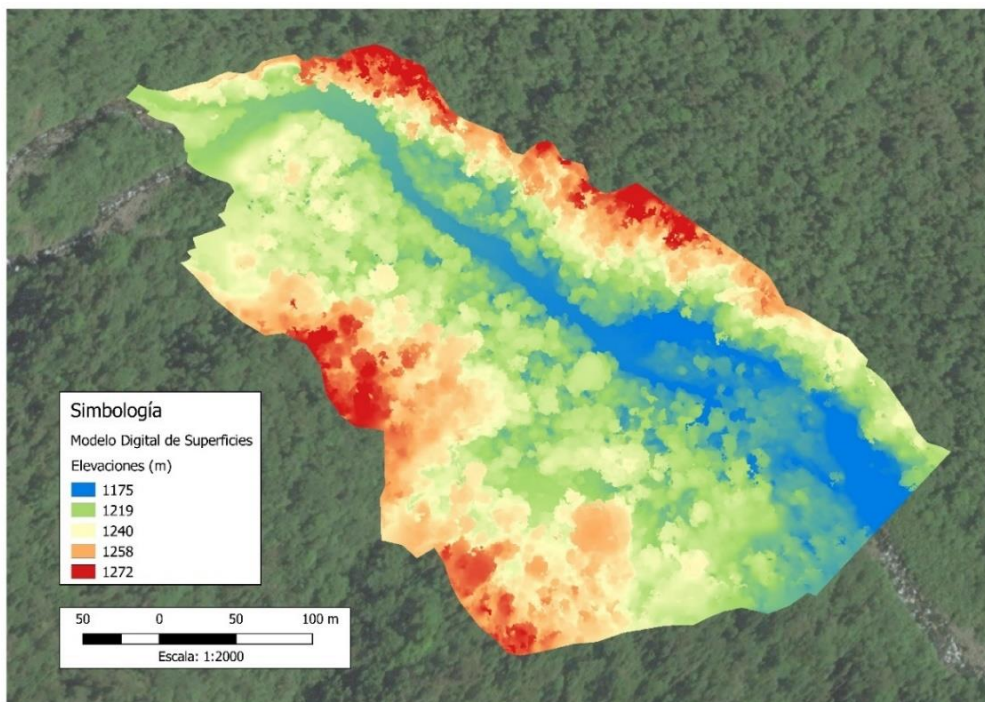


Figura 15. Sobreposición entre el Ortomosaico y el MDS, Río Patria, diciembre 2017

El MDS y el ortomosaico se exportaron en el sistema CRTM05, en formato TIFF, tal como se muestra en la siguiente figura:

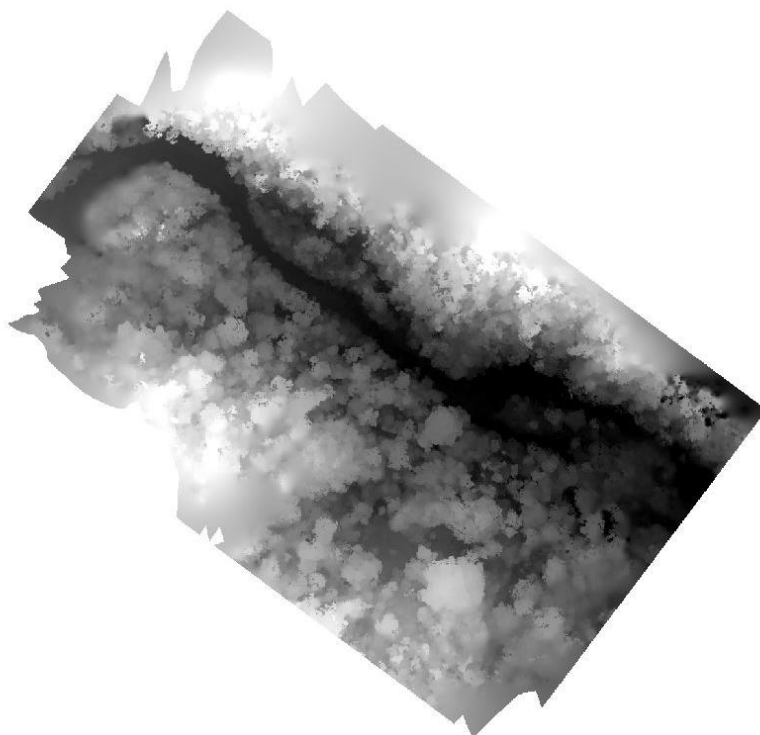


Figura 16. MDS, formato TIFF, Río Patria, diciembre 2017

## 5.2 Determinación de caudal promedio

### 5.2.1 Aforos por Área-Velocidad

Durante el periodo de investigación, se realizaron doce aforos por el método de Área-Velocidad, comúnmente conocido como aforo con molinete, cuyos resultados en relación al caudal obtenido se resumen a continuación:

Cuadro 10. Aforos de corrientes con molinete

No.	Fecha	Caudal (m <sup>3</sup> /s)
1	12/08/2017	0.97
2	23/08/2017	1.01
3	08/09/2017	0.89
4	21/09/2017	2.30
5	20/10/2017	1.62
6	25/01/2018	2.64
7	20/03/2018	1.16
8	23/03/2018	1.21
9	27/03/2018	1.32
10	09/04/2018	1.54
11	19/04/2018	1.50
12	04/05/2018	1.17

La información detallada de los cálculos de estos aforos se puede observar en el Anexo 5. De lo anterior se colige que el caudal menor fue 0.89 m<sup>3</sup>/s en fecha 08/09/2017 y el mayor fue de 2.64 m<sup>3</sup>/s en fecha 20/10/2017 y el caudal promedio aritmético fue de 1.44 m<sup>3</sup>/s, lo cual sustenta la importancia de la investigación, al estar frente a una fuente de agua con un caudal sostenido de 1.38 m<sup>3</sup>/s, obtenido a partir de 10 restantes aforos, una vez despreciados el máximo y el mínimo ya citados.

Derivado de los datos anteriores, se han trazado dos curvas de descarga (antes y después de la Tormenta Nate), que nos permiten obtener la relación continua entre la escala y el caudal obtenido para el Sitio de Toma de Agua, tal como se observa en la Figura 17.

Cuadro 11. Valores Escala vs Caudal

Escala (m)	Q (m <sup>3</sup> /s)
0.57	0.97
0.57	1.01
0.56	0.89
0.79	2.30
0.46	1.62
0.59	2.64
0.42	1.16
0.43	1.21
0.44	1.32
0.47	1.54
0.47	1.50
0.43	1.17

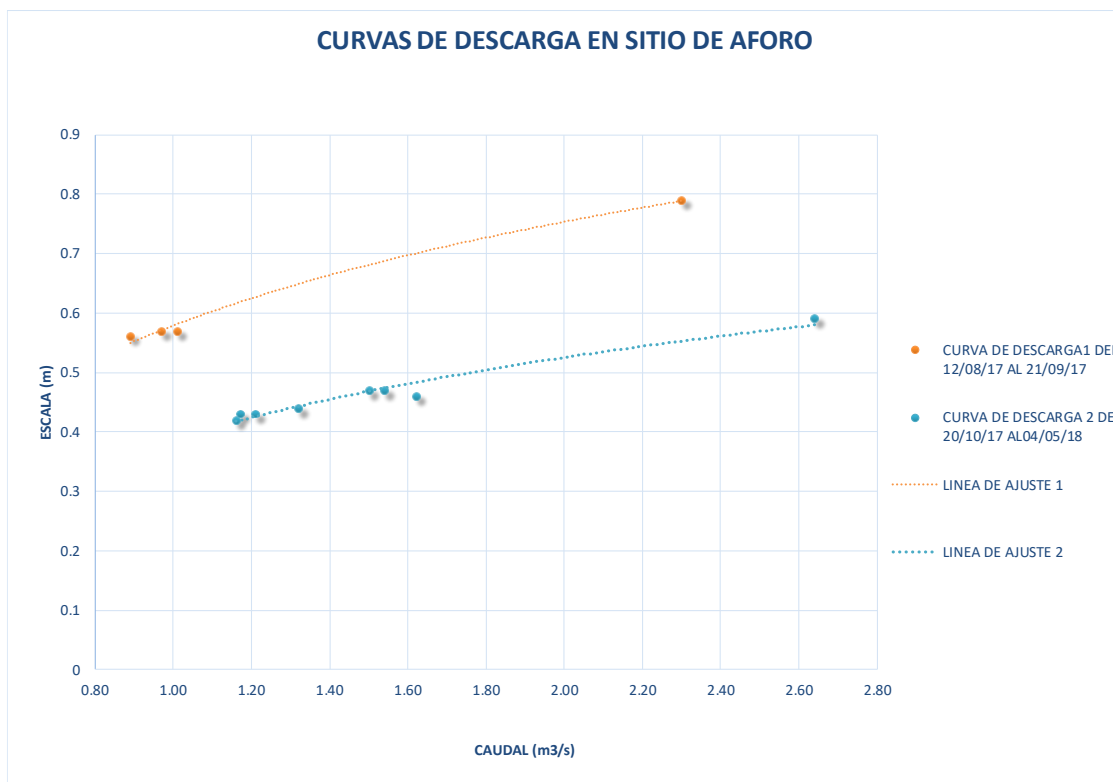


Figura 17. Curvas de descargas en la subcuenca del Río Patria

Los otros datos hidráulicos de la sección de medición, utilizando 10 aforos (velocidad del agua, longitud del tramo, área, perímetro mojado y radio hidráulico), se muestran en el siguiente cuadro. En la fila final se muestra la sección homogenizada o promedio del tramo de estudio.

Cuadro 12. Datos hidráulicos de la sección de medición

No Aforo	Longitud del Tramo (m)	Área (m <sup>2</sup> )	P <sub>m</sub> (m)	R <sub>h</sub> (m)
1	6.10	2.63	6.76	0.39
2	6.00	2.53	6.73	0.38
4	9.10	3.8	10.67	0.36
5	4.85	2.32	5.62	0.41
7	6.40	2.06	6.68	0.31
8	6.30	2.00	6.59	0.30
9	6.20	2.16	6.47	0.33
10	6.40	2.30	6.62	0.35
11	6.40	2.25	6.70	0.34
12	6.30	2.00	6.70	0.30
Sección homogenizada	6.41	2.41	6.95	0.35

### 5.2.2 Método Área-Pendiente

De este método, conocido también como levantamiento hidrográfico, se obtienen todos los datos necesarios para la aplicación de la fórmula de Manning. En esta investigación fue necesario realizar levantamientos hidrográficos en dos fechas distintas, para analizar los efectos de la Tormenta Tropical Nate en el tramo de estudio. Dichos datos se tabulan a continuación:

Cuadro 13. Levantamiento hidrográfico 10/09/2017

Determinación del Caudal para la escala 0.72 del 10 de setiembre 2017				Método
Área-Pendiente				
Variable	Sección Aguas Arriba	Sección Central	Sección Aguas Abajo	
Estacionamiento	0+000	0+021.03	0+045.96	
Área (m <sup>2</sup> )	3.61	3.98	4.37	
Perímetro mojado (m)	8.81	17.86	14.61	
Radio Hidráulico (m)	0.41	0.22	0.30	
Valor Promedio		Para todo el tramo de estudio		
Pendiente				1.80 %
Coeficiente de Rugosidad				0.106
Área (m <sup>2</sup> )				3.987
Perímetro mojado (m)				13.760
Radio Hidráulico (m)				0.311
<b>Caudal (Q) (m<sup>3</sup>/s)</b>				<b>2.31</b>

Cuadro 14. Levantamiento hidrográfico 05/12/2017

Determinación del Caudal para la escala 0.55 del 05 de diciembre 2017				Método
Área-Pendiente				
Variable	Sección Aguas Arriba	Sección Central	Sección Aguas Abajo	
Estacionamiento	0+000	0+021.03	0+045.96	
Área (m <sup>2</sup> )	4.32	2.47	4.13	
Perímetro mojado (m)	9.11	10.84	11.51	
Radio Hidráulico (m)	0.47	0.23	0.36	
Valor Promedio		Para todo el tramo de estudio		
Pendiente				1.86 %
Coeficiente de Rugosidad				0.091
Área (m <sup>2</sup> )				3.640
Perímetro mojado (m)				10.487
Radio Hidráulico (m)				0.354
<b>Caudal (Q) (m<sup>3</sup>/s)</b>				<b>2.710</b>

Los datos de los cuadros anteriores se obtienen de los planos dibujados a partir de los datos del levantamiento hidrográfico respectivo, que se observan en el Anexo 6.

### 5.2.3 Análisis de la socavación producida por la tormenta Nate en las secciones del tramo de estudio en el Río Patria

Es conocido que Costa Rica fue afectado por la denominada tormenta tropical Nate durante los días 4 y 5 de octubre del año 2017, causando grandes estragos prácticamente en todo el territorio nacional, incluyendo la Zona Central y Caribe, donde se ubica la zona de estudio de esta investigación, habiéndose registrado lluvias de hasta 200 mm en la zona de estudio (Instituto Meteorológico Nacional citado en el informe de la Presidencia de la Republica, “Costa Rica, Tormenta Tropical Nate, 11 de octubre del 2017”).

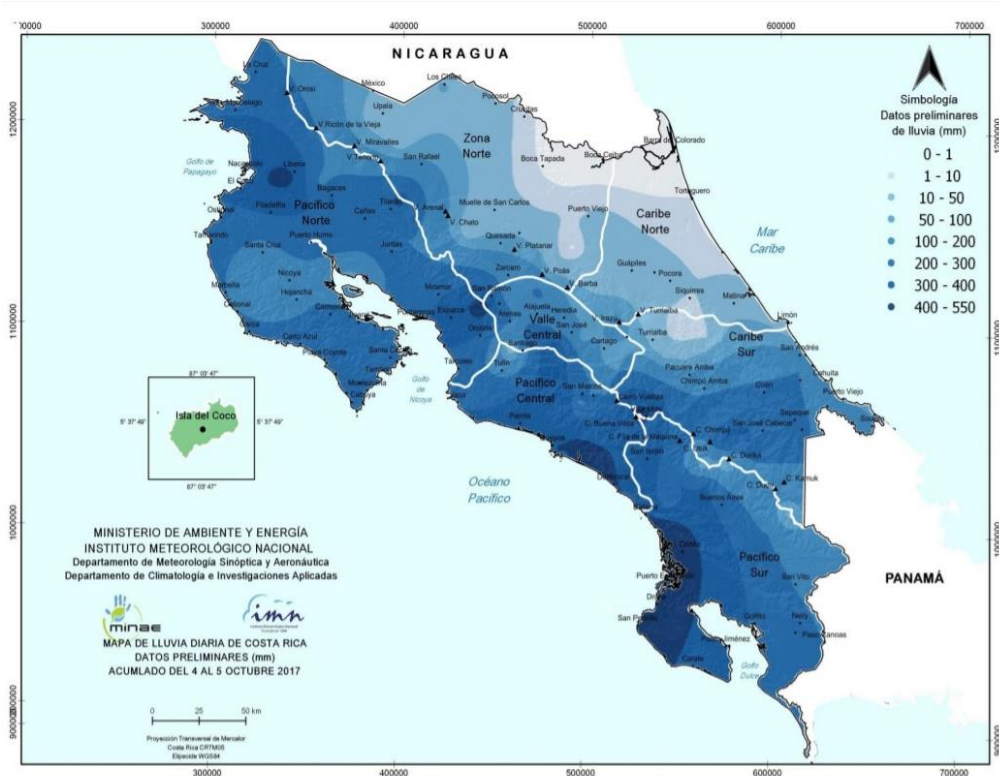


Figura 18. Acumulación de lluvia, de los días 4 al 5 de octubre, 2017. Fuente IMN

Estas condiciones climatológicas produjeron varios efectos en la zona del Parque Nacional Braulio Carrillo: caída de árboles, deslizamientos, arrastre de grandes cantidades de sedimentos, destrucción de caminos y veredas y cambios en los cauces de las corrientes de agua. El cauce del Río Patria se vio afectado por el transporte de troncos, ramas y gran volumen de piedras de variado tamaño (grava fina y gruesa), ocasionando socavación y rellenos en el cauce.

Las secciones transversales que se habían establecido en el tramo de estudio para esta investigación durante el primer levantamiento hidrográfico (setiembre 10, 2017) con la finalidad de aplicar el Método de Área Pendiente y con él obtener los caudales de interés, se vieron modificadas por socavación y relleno, a raíz de la tormenta Nate, haciendo necesario la realización de un segundo levantamiento hidrográfico (diciembre 05, 2017) con la producción de nuevos perfiles de las secciones transversales originalmente establecidas, que nos permite determinar el grado de cambio y efectos por socavación que sufren las tres secciones transversales.

Analizando y comparando los perfiles, antes y después de Nate, de cada una de las secciones transversales se obtienen los cambios sufridos en ellas, y con esto, se determina la modificación que sufre la incipiente Curva de Descarga que se establecía para la sección de aforos, lo cual es esencial a fin de establecer el caudal mínimo y máximo durante el tiempo de estudio, que presenta el Río Patria en este breve periodo de medición.

#### Análisis de los Perfiles de las Secciones Transversales

- i. **Sección Aguas Arriba:** La sección aguas arriba en general presenta un socavamiento con magnitudes variables con un promedio de 0.60 m en la margen derecha en sus primeros 4 m, sin embargo, también presenta un relleno de hasta 0.80 m en la margen izquierda, iniciando en el centro del cauce en el estacionamiento 0+011.00, lo cual demuestra que los efectos no son homogéneos a lo ancho de la sección transversal.
- ii. **Sección Central:** Esta sección central se observa con una afectación más uniforme. Es así como en la margen derecha, donde se ubica el cero del "limnómetro", desde su inicio hasta el estacionamiento 0+015.96 los perfiles mantienen un promedio de 0.23 m de socavación, pero se invierte el efecto y a partir de este estacionamiento hasta llegar a la margen izquierda (0+024.37) se tiene un relleno promedio de 0.35 m. Por lo anterior, se tiene un relleno mayor que el de socavación a lo largo del ancho de la sección, pero siendo un leve efecto en el centro de esta sección, dándose la razón de heterogeneidad de los efectos de socavación, al igual que la anterior sección.
- iii. **Sección Aguas Abajo:** Esta sección aguas abajo sufrió con el evento de mención, una socavación prácticamente en todo lo largo de su ancho, principalmente en la margen izquierda donde la socavación alcanza valores apreciables de 0.92 m en forma continua desde margen izquierda a margen derecha.

Del análisis de los datos de los perfiles de las secciones transversales citadas, se obtiene que:

- La socavación presentada en el tramo de estudio del Río Patria es notablemente mayor que el relleno, por efectos de la tormenta Nate.
- La socavación se presenta con mayor fuerza en la margen izquierda del tramo de estudio, siendo casi nula en la margen derecha, donde se halla el nivel cero de referencia en la sección central del tramo de estudio y donde se realizan los aforos de caudal.
- La socavación longitudinal del tramo de estudio se da en forma intermitente, es decir que se tiene relleno y socavación por tramos a lo largo del río.

Por lo tanto, la Tormenta Tropical Nate tuvo los siguientes impactos hidráulicos a considerar:

1. Los efectos del fenómeno de relleno y socavación en el tramo de estudio del Río Patria producidos por la tormenta Nate, ha provocado afectación al cero del “limnómetro” o punto de referencia de los aforos, al haberse socavado un promedio de 18 cm, lo cual origina una segunda curva de descarga que funciona, presumiblemente desde días después de la ocurrencia de la tormenta Nate hasta la fecha.

2. Derivado de lo anterior, se trazaron dos curvas de descarga para el sitio de aforos en la elevación 1204 m en el Río Patria, siendo la segunda curva con validez para extrapolar y hallar los valores altos de la curva a partir de noviembre del 2017.

3. Del análisis del comportamiento del socavamiento y relleno en el tramo de estudio se determina que el mismo es típico de un río de montaña y se puede presumir, fundamentado en lo anterior, que el Río Patria pudo comportarse, en relación con los efectos de la Tormenta Nate, de la misma forma a lo largo de todo su cauce, lo cual cobra interés para un análisis futuro del sitio de Toma de Aguas.

#### **5.2.4 Método por estimación**

A pesar de ser un método inexacto, este se ha aplicado con la finalidad de tener una aproximación del caudal del Río Patria en la primera incursión al sitio de aforo (25 de julio del 2017), obteniéndose los siguientes resultados.

Cuadro 15. Datos y resultado de caudal por el método de la estimación

Determinación del Caudal para el nivel del espejo de agua del 25 de julio 2017	
Velocidad promedio(m/s)	1.24
Profundidad(m)	0.24
Area(m <sup>2</sup> )	1.92
Caudal (Q) (m <sup>3</sup> /s)	2.38

Este caudal, sin escala e inicialmente sin valoración dado el desconocimiento total a esa fecha del comportamiento del Río Patria, cobra importancia con este Informe, pues se considera un valor normal dentro de la serie de caudales que se han obtenido en esta investigación, ya que se ubica dentro los valores promedios de la serie y viene a reforzar el comportamiento estable del Río Patria en relación a los caudales que se presentan en el sitio de Toma de Agua.

### 5.3 Rutas de trasvase de agua

#### 5.3.1 Rutas propuestas

Para efectos de esta investigación, se proponen cinco rutas, las cuales se describen a continuación (Ver Anexo 7):

1. **Ruta Río Patria-Santo Domingo:** iniciaría en la toma de agua en las coordenadas CRTM05 Este 496651.6 m, Norte 1114802.2 m y elevación 1260 msnm. En las mismas coordenadas iniciaría el túnel, que tendría una longitud de 10.5 Km, llegando a las coordenadas Este 491605.7 m, Norte 1105596.0 m y elevación 1229.7 msnm. El túnel tendría una pendiente de -0,3 %. Luego, proseguiría mediante tubería enterrada con una longitud de 2.5 Km y una pendiente promedio de -2.4 %. Su llegada se encontraría en la ciudad de Santo Domingo de Heredia, a una elevación de 1168.9 msnm, en las coordenadas Este 490745.2 m, Norte 1103471.2 m.

El sitio de llegada tiene, actualmente, una cobertura de cultivos y zonas verdes. El predio es propiedad de la Sociedad ADA LTDA, con número de finca 4 071391A y plano catastrado H-1092551-2006.

2. **Ruta Río Patria-Santo Tomás:** iniciaría en el mismo punto de toma de la ruta N°1. Comenzaría con un túnel, el cual tendría una longitud de 9.9 Km, que terminaría en las coordenadas Este 492892.9 m, Norte 1105651.5 m, en una elevación de 1220.6 msnm. Dicho túnel tendría una pendiente de -0,4 %.

Posteriormente la ruta continuaría con tubería enterrada 2.3 Km con una pendiente promedio de -0.9 %, hasta el sitio llegada en Santo Tomás de Santo Domingo, a una elevación de 1200.0 msnm, en las coordenadas Este 492547.5 m, Norte 1103980.9 m,

El sitio de llegada tiene, actualmente, una cobertura de cultivos y zonas verdes. El predio es propiedad de la Cafetalera Santa Fe LCLV S.A., con número de finca 4 0088591 cuyo plano catastrado es el H-0015655-1972.

- Ruta Río Patria-Socorro:** el punto de toma sería igual al descrito para las Rutas 1 y 2, iniciando igualmente mediante un túnel, el cual tendría una longitud de 10.2 Km, encontrándose el portal de salida en las coordenadas Este 493387.4 m, Norte 1105152.6 m, a una elevación de 1229.7 msnm. El túnel tendría una pendiente de -0,4 %. Luego proseguiría mediante tubería enterrada 2.1 Km, con una pendiente promedio de -1.2 %, hasta llegar a Socorro de Santo Domingo a una elevación de 1198.2 msnm, en las coordenadas Este 493267.6 m, Norte 1103280.1 m.

El sitio de llegada tiene, actualmente, una cobertura de cultivos y zonas verdes. El predio es propiedad de Gala Náutica S.A., con número de finca 4 0088811 y cuyo plano catastrado es el H-0942332-2004.

Inicialmente, la Ruta Río Patria-Socorro de Santo Domingo, se planteó entregando sus aguas en el Tanque de Agua del AyA, situado en Tibás, lo cual facilitaba la distribución y aprovechaba la infraestructura existente; no obstante, se determinó que esta estructura no tiene la capacidad para recibir el caudal proveniente del Río Patria, ni hay espacio disponible en la parcela para realizar nuevas obras de infraestructura.

Según Hidalgo (2018), de la Unidad de Optimización de Sistemas de la GAM en el Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados, el tanque de Tibás tiene una capacidad de 5000 m<sup>3</sup> y ya está funcionando a su máxima capacidad. Además, recibe las aguas de bombeo de la Uruca, el bombeo de San Miguel de Santo Domingo de Heredia y de la planta Los Sitios de Moravia.

Por lo anterior, la entrega de la Ruta Río Patria-Socorro de Santo Domingo se estableció en Socorro de Santo Domingo, en la margen derecha del Río Virilla, y no en un sitio que hubiera parecido bastante conveniente como lo es el tanque Tibás del AyA.

4. **Ruta Río Patria-San Vicente de Moravia (opción sin túnel):** para esta ruta, la ubicación del punto de toma se seleccionó en función de su elevación, la cual, es la mínima posible para obtener la ruta más corta sin la necesidad de túnel. La ruta corresponde al contorno generado al trazar una superficie de corte, en la cual uno de sus lados tiene como vértices el punto de toma, con coordenadas Este 495152.4 m, Norte 1115628.7 m y elevación de 1515 msnm, y el punto de desvío, con coordenadas Este: 497239.7 m, Norte: 1108737.9 m y con una elevación de 1400 msnm, en donde la tubería iniciaría su ubicación a orilla de calle.

El sitio de llegada es en San Jorge de San Vicente de Moravia, a una elevación de 1140 msnm. En total, la ruta implicaría la colocación de 44.1 Km de tubería. La pendiente promedio total de la ruta sería de -0,8 %.

El sitio de llegada de esta ruta se encontraría sobre la finca propiedad de Ana Isabel, Leonel y Olman todos Alvarado Delgado, cuyo número de finca es 1 453662, con plano catastrado SJ-359268-1996, ubicado en las coordenadas Este 493922.9 m, Norte 1102521.0 m. Este lote está libre de edificaciones y tiene una cobertura de cultivos y zonas verdes.

5. **Ruta Río Patria-San Vicente de Moravia:** Con el fin de disminuir el recorrido de la Ruta Río Patria-San Vicente de Moravia, se propone el trazado de un túnel, lo que da origen a esta propuesta.

La ruta utilizaría el mismo punto de toma y el trayecto de la Ruta Río Patria-San Vicente de Moravia (opción sin túnel), hasta el punto con coordenadas Este 498956.0 m, Norte 1112009.4 m y elevación 1497 msnm; donde iniciaría el túnel. El túnel tendría una pendiente de -0.8 % y una longitud de 3.2 Km, hasta salir en las coordenadas Este 496908.4 m, Norte 1109585.1 m y elevación: 1470 msnm. Continuaría desde allí en adelante con el mismo recorrido de la Ruta Río Patria - San Vicente de Moravia, llegando de igual manera a San Jorge de San Vicente de Moravia, a las coordenadas Este 493922.9 m, Norte 1102521.0 m y elevación 1140 msnm, a la misma propiedad de los hermanos Alvarado Delgado.

La Ruta Río Patria-San Vicente de Moravia con túnel tendría una longitud total de 29.8 Km, de los cuales 26.6 Km corresponderían a tubería, en donde la pendiente promedio de la tubería desde el punto de toma hasta el portal de entrada del túnel sería de -0.1 % y desde el portal de salida del túnel hasta el

sitio de llegada final sería de -3.8 %. La pendiente promedio de la totalidad de la ruta sería de -1.3 %.

Las rutas 1, 2 y 3 tendrían su punto de toma en la menor elevación posible que permite trasvasar el agua por gravedad a sitios lo más cercanos posible a la ciudad de San José. Dicha elevación mínima para el punto de toma sería de 1260 msnm, donde el caudal es de 1,44 m<sup>3</sup>/s.

Este sitio de toma se estableció en una sección angosta, cuyos taludes derecho e izquierdo están relativamente cercanos (basados en análisis de curvas de nivel), lo cual facilitaría la construcción de obras para establecer la bocatoma de agua.

El valor del caudal obtenido en el punto de aforo ubicado en las coordenadas Este 497646.3 m, Norte 1114806.056 y elevación 1189.8 m, se trasladó al sitio de toma de las Rutas 1, 2 y 3, coordenadas Este 496651.6 m, Norte 1114802.2 m y elevación 1260 msnm, ya que no existen aportes de agua entre ambos puntos, pudiéndose asumir de este modo que el caudal es el mismo.

Las primeras tres rutas propuestas requerirían de un túnel trasvase, que guíe las aguas por el interior de la montaña desde el punto de toma (cercano al sitio de aforo) hasta la cuenca del Río Virilla, desde donde se llevaría el agua por medio de tuberías hasta el punto de llegada definido.

Para las rutas 4 y 5 no se cuenta con un valor de caudal, ya que para efectos de esta investigación no se utilizaron métodos teóricos o de interpolación para el cálculo del mismo. Esto debido a que los datos requeridos como insumo para su respectivo cálculo son limitados, poco confiables o inexistentes en la zona de estudio.

En el cuadro 16 se resumen las características y atributos de las rutas propuestas.

### **5.3.2 Valoración de las rutas**

En los cuadros 17 y 18 se muestran las variables y la calificación obtenida en cada rubro, para culminar con las puntuaciones globales para cada una de las rutas propuestas.

Cuadro 16. Valoración de las rutas

VARIABLES	RUTAS				
	Ruta 1: Río Patria-Santo Domingo	Ruta 2: Río Patria-Santo Tomás	Ruta 3: Río Patria-Socorro	Ruta 4: Río Patria-San Vicente de Moravia (opción sin túnel)	Ruta 5: Río Patria-San Vicente de Moravia
Coordenadas del punto de toma	E = 496651,6 m N = 1114802,2 m Elevación = 1260,0 msnm	E = 496651,6 m N = 1114802,2 m Elevación = 1260,0 msnm	E = 496651,6 m N = 1114802,2 m Elevación = 1260,0 msnm	E = 495152,4 m N = 1115628,7 m Elevación = 1515,0 msnm	E = 495152,4 m N = 1115628,7 m Elevación = 1515,0 msnm
Coordenadas de la entrada del túnel / Lugar	E = 496651,6 m N = 1114802,2 m Elevación = 1260,0 msnm Lugar: Río Patria	E = 496651,6 m N = 1114802,2 m Elevación = 1260,0 msnm Lugar: Río Patria	E = 496651,5 m N = 1114802,2 m Elevación = 1260,0 msnm Lugar: Río Patria	NO APLICA	E = 498956,0 m N = 1112009,4 m Elevación = 1497,0 msnm Lugar: Parque Nacional Braulio Carrillo
Coordenadas del portal de salida del túnel / Lugar	E = 491605,7 m N = 1105596,0 m Elevación = 1229,7 msnm Lugar: San Francisco, San Isidro, Heredia	E = 492892,9 m N = 1105651,5 m Elevación = 1220,6 msnm Lugar: Quebradas, San Francisco, San Isidro, Heredia	E = 493381,4 m N = 1105152,6 m Elevación = 1229,7 msnm Lugar: Quebradas, Ángeles (Tures), Santo Domingo, Heredia	NO APLICA	E = 496908,4 m N = 1109585,1 m Elevación = 1470,0 msnm Lugar: Santa Cecilia, Concepción, San Isidro, Heredia
Coordenadas de la llegada de la ruta / Lugar	E = 490745,2 m N = 1103471,2 m Elevación = 1168,9 msnm Lugar: Santo	E = 452547,5 m N = 1103980,9 m Elevación = 1200,0 msnm Lugar: Santo Tomás,	E = 493267,6 m N = 1103280,1 m Elevación = 1198,2 msnm Lugar: Socorro, San	E = 493922,9 m N = 1102521,0 m Elevación = 1140,0 msnm Lugar: San Vicente,	E = 493922,9 m N = 1102521,0 m Elevación = 1140,0 msnm Lugar: San Vicente,

VARIABLES	RUTAS				
	Ruta 1: Río Patria-Santo Domingo	Ruta 2: Río Patria-Santo Tomás	Ruta 3: Río Patria-Socorro	Ruta 4: Río Patria-San Vicente de Moravia (opción sin túnel)	Ruta 5: Río Patria-San Vicente de Moravia
	Domingo, Heredia	Santo Domingo, Heredia	Miguel, Santo Domingo, Heredia	Moravia, San José	Moravia, San José
Longitud del túnel (km)	10,5	9,9	10,2	NO APLICA	3,2
Longitud de tubería enterrada (km)	2,5	2,3	2,1	44,1	26,6
Pendiente del túnel (%)	0,3	0,4	0,4	NO APLICA	0,8
Pendiente promedio del tramo de tubería enterrada (%)	2,4	0,9	1,2	0,8	1,4
Pendiente promedio de ruta (%)	0,7	0,5	0,5	0,8	1,3
Cobertura máxima del túnel (m)	807,0	810,0	745,0	NO APLICA	186,0
Caudal (m <sup>3</sup> /s)	1,44	1,44	1,44	SIN DATO	SIN DATO
Afectaciones a ciudades	- San Francisco, San Isidro, Heredia (túnel) - Santo Domingo, Heredia (tubería enterrada)	- San Isidro, Heredia (túnel) - Quebradas, San Francisco, San Isidro, Heredia (tubería enterrada) - Ángeles (Tures),	- Concepción, San Isidro, Heredia (túnel) - San Isidro, Heredia (túnel) - Quebradas, Ángeles (Tures),	- Dulce Nombre, Vásquez de Coronado, San José (tubería enterrada) - San Jerónimo, Moravia, San	- San José, San Isidro, Heredia (túnel) - Va por la Ruta 32 desde el cruce de San Isidro hasta el cruce de San Miguel

VARIABLES	RUTAS				
	Ruta 1: Río Patria-Santo Domingo	Ruta 2: Río Patria-Santo Tomás	Ruta 3: Río Patria-Socorro	Ruta 4: Río Patria-San Vicente de Moravia (opción sin túnel)	Ruta 5: Río Patria-San Vicente de Moravia
		Santo Domingo, Heredia (tubería enterrada) - Santo Tomás, Santo Domingo, Heredia (tubería enterrada)	Santo Domingo, Heredia (túnel) - Ángeles (Tures), Santo Domingo, Heredia (tubería enterrada) - Socorro, San Miguel, Santo Domingo, Heredia (tubería enterrada)	José (tubería enterrada) - San José, San Isidro, Heredia (tubería enterrada) - Va por la Ruta 32 desde el cruce de San Isidro hasta el cruce de San Miguel y San Jorge (tubería enterrada)	y San Jorge (tubería enterrada)

Cuadro 17. Variables y puntuación de las rutas

VARIABLES	RUTAS				
	Ruta 1: Río Patria-Santo Domingo	Ruta 2: Río Patria-Santo Tomás	Ruta 3: Río Patria-Socorro	Ruta 4: Río Patria-San Vicente de Moravia (opción sin túnel)	Ruta 5: Río Patria-San Vicente de Moravia
Elevación del punto de toma	1	1	1	20	20
Caudal	18	18	18	1	1
Longitud del túnel	1	1,8	1,4	15	10,7
Longitud de tubería enterrada	12,3	12,4	13	1	5,8
Elevación de la llegada de la ruta	5,8	11	10,7	1	1
Afectación a ciudades	9 (fincas con pastos, calles secundarias)	8 (fincas con pastos, Ruta Nacional 117)	7 (fincas con pastos, Ruta Nacional 117, propiedades en el casco central)	1 (fincas con pastos, Ruta Nacional 32)	1,5 (fincas con pastos, Ruta Nacional 32)
Pendiente promedio de la ruta	2,5	1	1	3,25	7
Cobertura máxima del túnel	1	1	1,5	7	5,6

Cuadro 18. Puntaje total de cada ruta

Ruta	Puntaje Total
Ruta 1: Río Patria-Santo Domingo	50,6
<b>Ruta 2: Río Patria-Santo Tomás</b>	<b>54,2</b>
Ruta 3: Río Patria-Socorro	53,6
Ruta 4: Río Patria-San Vicente de Moravia (opción sin túnel)	49,3
Ruta 5: Río Patria-San Vicente de Moravia	52,6

#### **5.4 Porcentaje a abastecer con respecto al déficit de agua existente en la GAM**

La determinación del déficit de agua potable en la GAM se halla en el estudio realizado por el Ingeniero Isidro Solís Blanco, denominado: “Proyección de oferta y demanda del Acueducto Metropolitano AyA con la integración de la Ampliación del Acueducto Metropolitano-Sistema Patarrá (Orosí II) 2016”, donde se enuncia como uno de los objetivos específicos la “estimación del déficit de producción, respecto a la demanda de agua en el área de estudio”.

En el citado estudio se establece que, para abril del año 2016, el Acueducto Metropolitano AyA, tenía una producción confiable registrada de 5527 l/s, y la demanda, para ese mismo período, según la Figura 19, fue de 7400 l/s. De allí, se desprende que en abril del 2016 el déficit en época seca (durante la demanda máxima) fue de: 1873 l/s.

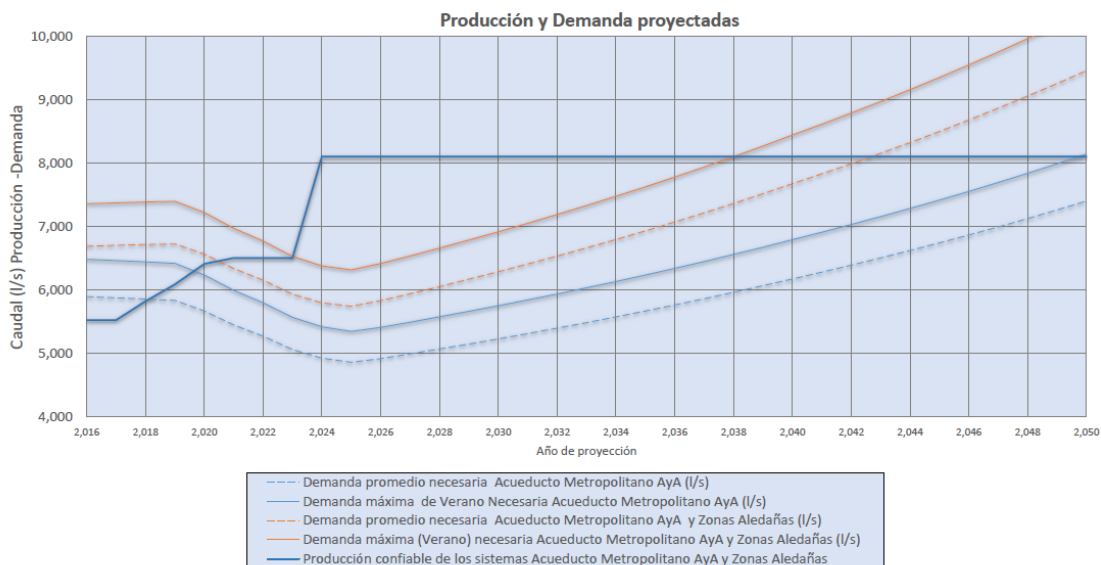


Figura 19. Producción y Demanda proyectadas

Tomado del estudio: Proyección de oferta y demanda del Acueducto Metropolitano AyA con la integración de la Ampliación del Acueducto Metropolitano-Sistema Patarrá (Orosí II) 2016.

Cabe resaltar que las proyecciones del estudio toman en cuenta dotaciones adicionales de proyectos futuros del AyA. Según Pérez Alfaro (2018), a la fecha de esta investigación, dicho proyectos aún están en etapas preliminares o en proceso de entrega para su operación. Es decir, el estudio de Solís utiliza supuestos que son legítimos y están detalladamente explicados, pero que aún no han entrado en vigor.

Es importante resaltar que la producción de agua potable se ve afectada por las circunstancias del tiempo atmosférico e, incluso, pueden existir variaciones muy significativas entre un año y otro. Así, durante el fenómeno del Niño Oscilación del Sur (ENOS), en su fase cálida, pueden existir disminuciones de hasta un 80 % en regiones del Pacífico y aumentos de hasta un 200 % en el Caribe. Durante la fase fría, tienden a invertirse las condiciones. Esto de acuerdo con el documento “El ENOS y sus efectos en Costa Rica”, del IMN (2105).

Según el IMN, durante el año 2015 y principios del 2016, imperó el fenómeno del Niño fase cálida (Instituto Meteorológico Nacional, 2015), de manera tal que, en la época en que se realizó el estudio, existía escasez de precipitación en la vertiente Pacífica, donde se encuentra la Cuenca del Río Virilla y la mayoría de la GAM, propiciando un mayor déficit de agua en la producción del AyA.

De acuerdo con Pérez Alfaro (2015), la entrada del fenómeno de la Niña durante los años 2017 y 2018 alivió la tensión que existía en la demanda del agua, ya que el aumento importante de las precipitaciones mejoró sustancialmente la producción de agua en los sistemas existentes. Con esto, a pesar de que los nuevos proyectos planeados por el AyA no han entrado en funcionamiento para las fechas pronosticadas en el estudio, la Niña ha aplacado de manera importante el déficit existente. Sin embargo, no se encontraron estudios recientes que puedan ser utilizados como base estadística del déficit y demanda en el 2018.

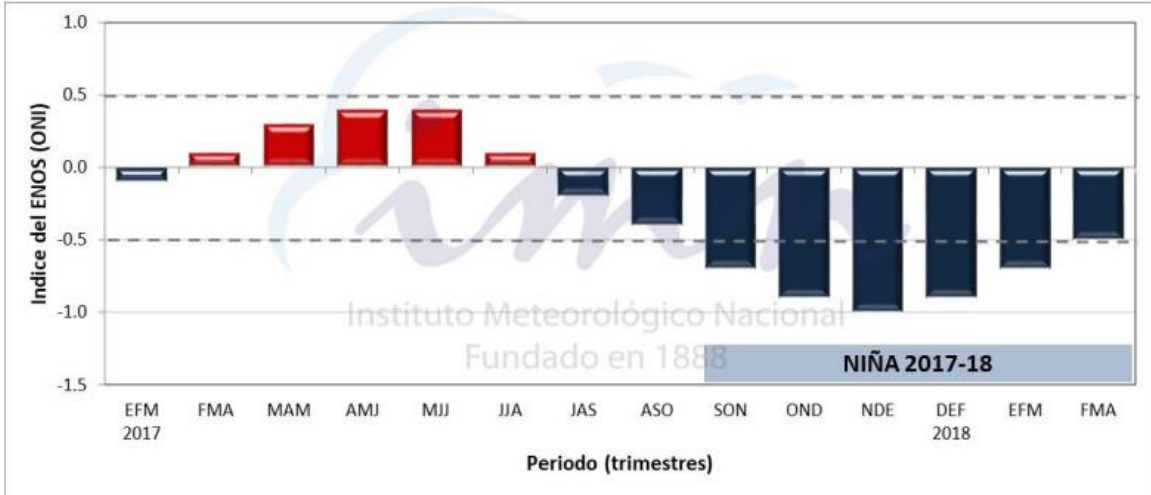


Figura 20. Variación Temporal del índice Niño entre junio 2016 y marzo 2018

Fuente: IMN, Boletín del ENOS No. 109 Informe 5 abril 2018, <https://www.imn.ac.cr/documents/10179/450551/> %23 %20109

Por lo descrito en los párrafos anteriores, para efectos de esta investigación, se utilizaron los datos correspondientes al año 2016 y que se basaron en observaciones concretas para esa fecha determinada. De esta manera, según la Figura 21, se puede notar que para el año 2016, existe un déficit bien definido, sin importar el escenario de demanda, ya sea en época seca o lluviosa.

En la siguiente figura, se muestra el déficit/superávit optimizado proyectado para el Acueducto Metropolitano y Zonas Aledañas.

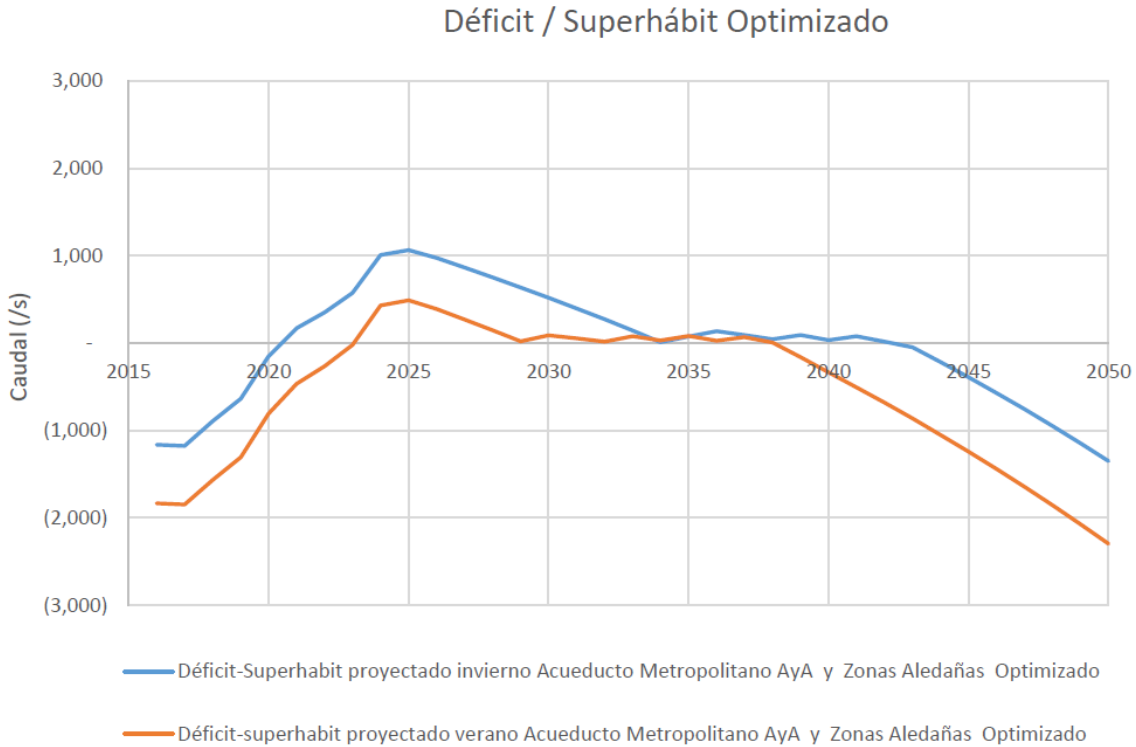


Figura 21. Déficit / Superhábit Optimizado.

Tomado del estudio: Proyección de oferta y demanda del Acueducto Metropolitano AyA con la integración de la Ampliación del Acueducto Metropolitano-Sistema Patarrá (Orosí II) 2016.

En virtud de las mediciones realizadas en el Río Patria durante esta investigación, este río presenta un caudal promedio de 1,44 m<sup>3</sup>/s (1440 l/s), en la elevación 1260 m. Por su parte, el caudal a captar, para posteriormente ser trasvasado, debe definirse a partir de la combinación de varios factores. Algunos de estos factores están constituidos por aspectos ecológicos y ambientales, que no se profundizan en esta investigación. Sin embargo, a pesar de la disminución en el caudal a captar que pueda darse, este caudal podría reducir un porcentaje significativo del déficit existente en la GAM.

Dado las características del sitio de toma de agua, principalmente su elevación y constancia del caudal, así como el sistema de drenaje que presenta la subcuenca hasta este punto, se podría asumir una captación de al menos 75 % del caudal promedio medido. De esta manera, según los datos del 2016, se podría abastecer el déficit en un 58 %, es decir, un caudal de 1080 l/s.

## 5.5 Calidad del agua sitio de aforo del Río Patria

Basándose en la metodología de muestreo de calidad de agua, se tomaron 3 muestras de agua en la sección de aforo en el Río Patria, estas fueron recolectadas los días 11 de mayo, 18 de junio y 9 de julio, del 2018. La primera de estas muestras fue llevada al Laboratorio de Ingeniería Ambiental de la Escuela de Ingeniería Civil, y los dos restantes al Laboratorio Químico Lambda, de donde se analizaron y se obtuvieron los resultados del Cuadro 19, lo cuales fueron contrastados con los valores máximos admisibles indicados en el Reglamento para la Evaluación y Clasificación de la Calidad de Cuerpos de Agua, N° 33903-MINAE-S, 2007 y el Reglamento de la Calidad de Agua Potable N°38924-S, 2015, esto según el parámetro a considerar y en virtud de una fuente superficial clase 1 o clase 2.

Cuadro 19. Resultados de parámetros para determinar calidad del agua

Parámetros	Unidad	Resultado de Laboratorio	Valor máximo admisible (Clase 1)	Laboratorio	Muestra
Conductividad	μS/cm	74	<400	Laboratorio de Ambiental, Escuela de Ing. Civil	1
Sólidos disueltos	ppm	37	<250		1
Color	UPtCo	0	2.5 < 10		1
pH		6.81	6.5 a 8.5		1
Turbidez	NTU	1.44	<25		1
Nitrato	mg/l	0.1	<5		1
Dureza total	mg/l	23 ± 1	400	Laboratorio Químico Lambda	2
DQO	mg/l	10 ± 1	<20		2
Calcio	mg/l	5.5 ± 0.1	100		2
Magnesio	mg/l	2.4 ± 0.0	<30		2
Manganeso	mg/l	< 0.01	0.5		2
Potasio	mg/l	1.5 ± 0.1	10		2
Hierro	mg/l	0.2 ± 0.1	0.3		2
Aluminio	mg/l	< 0.05	0.2		2
Sodio	mg/l	2.4 ± 0.0	200		2
Cloruros	mg/l	2.3 ± 0.1	250		2
Sulfatos	mg/l	1.0 ± 0.1	250		2
Fluoruros	mg/l	0.40 ± 0.03	<1.0		2
Cobre	mg/l	< 0.05	<0.5		2
Zinc	mg/l	< 0.05	3		2
Coliformes fecales	NMP/100 ml	< 1	<20		3
Escherichia Coli	NMP/100 ml	< 1	Ausencia	3	

En los resultados del laboratorio, se puede observar que todos los parámetros, tanto físicos, químicos como microbiológicos, son menores a los valores máximos admisibles, así, por ejemplo, el pH corresponde a un valor de 6.81, lo que refleja que la muestra de agua es casi neutra. El valor obtenido de dureza, refleja que la muestra se considera blanda, lo que implica poca capacidad de amortiguación del pH. También, los valores de turbiedad son inferiores a los valores límites permitidos y recomendados, lo que indica que el agua analizada no presenta problemas de apariencia para su consumo, esto además se complementa con la prueba de color.

La conductividad al estar directamente relacionada con la cantidad total de sólidos disueltos, también cumple, lo que indica que no se tiene problema con contenido de sales en el agua.

La medición del parámetro Hierro se encuentra por debajo del límite del valor admisible, sin embargo, si se considera la incertidumbre dada por el laboratorio, este puede llegar al valor máximo admisible establecido en el Reglamento de la Calidad del Agua Potable, no obstante, a partir de los procesos físicos se puede eliminar el exceso de hierro en el agua.

Por otro lado, la bacteria *Escherichia Coli* se establece dentro del Reglamento de la Calidad del Agua como un parámetro, el cual no debe ser detectado, es decir, este debe ser nulo. En este punto, vale la pena acotar que el Reglamento de Calidad de Agua Potable, al establecer esa condicionante parte del supuesto que el agua ya ha sido tratada, por lo que es claro que debido a esto, no se puede permitir la presencia de la bacteria, sin embargo, para el caso en estudio, el Río Patria, no tiene en el momento de esta investigación ninguna toma establecida, por lo tanto las muestras no corresponden a agua tratada, es decir, que aunque la bacteria aparece con un valor muy bajo, la misma no se considera significativa porque al establecer un tratamiento básico con cloro o similar, el porcentaje encontrado puede desaparecer al 100 %, además, los coliformes fecales, están también por debajo del máximo admisible, considerándose casi nulos. De manera que si todos los valores de metales, y los parámetros bacteriológicos se encuentran porcentualmente muy por debajo de los máximos, se puede garantizar el consumo del agua del Río Patria, para consumo humano y, además, se considera de buena calidad física, química y microbiológica.

## CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 6.1 Conclusiones

1. A través de la medición directa con equipo GNSS, se obtuvieron las coordenadas CRTM05 del sitio de aforo, Este 497646.26 m, Norte 1114806.06 m y elevación 1189.82 m. Por su parte, para los puntos de toma, las coordenadas fueron obtenidas a partir de la cartografía oficial del IGN y el DEM elaborado. Las coordenadas del punto de toma 1 (utilizado para Rutas 1, 2 y 3) son Este 496651.6 m, Norte 1114802.2 m y elevación 1260 msnm, y las coordenadas del punto de toma 2 (utilizado para las Rutas 4 y 5) son Este 495152.4 m, Norte 1115628.7 m y elevación de 1515 msnm.
2. Con las mediciones de 12 aforos realizados, se obtuvo un caudal promedio de 1,44 m<sup>3</sup>/s, en la elevación de 1189.82 m, en el sitio de aforo sobre el Río Patria. Siendo el caudal máximo 2.64 m<sup>3</sup>/s, y el mínimo 0.89 m<sup>3</sup>/s.
3. La subcuenca en estudio se caracteriza por tener una variación de elevación que va entre 1183 msnm y 2520 msnm, con pendientes medias en las laderas de 21 %, con una longitud total de cauces de 11.38 Km, y con presencia de suelos tipo andisoles, además de que presenta 4 horas de brillo solar al día, una temperatura media anual entre 12<sup>o</sup>C y 18<sup>o</sup>C. Los valores de precipitación promedio anual estudiados fueron variables, sin embargo, se concluye que la precipitación promedio anual en la zona se encuentra en un rango entre 5000-7000 mm, esto debido a los datos observados de las estaciones meteorológicas del IMN, y del ICE.
4. Sí es viable topográficamente el trasvase de agua por gravedad desde el Río Patria hasta la cuenca media del Río Virilla, a partir de las cinco rutas estudiadas en esta investigación, siendo la Ruta 2 la de mayor valoración (Río Patria – Santo Tomás).
5. El proyecto es hidrológicamente viable, ya que, según los caudales obtenidos en el punto de aforos del Río Patria, se abastece un 58 % del déficit de agua para consumo humano en la GAM.
6. Los resultados de los análisis de laboratorio efectuados a las muestras de agua tomadas en el sitio de aforo en el Río Patria muestran que el agua es susceptible de acondicionarla para consumo humano, de acuerdo con el Reglamento para la Calidad del

Agua Potable y Reglamento para la evaluación y clasificación de los cuerpos superficiales.

De los resultados hallados en esta investigación, se obtiene como **conclusión general** que es totalmente viable el trasvase de agua, por gravedad, del Río Patria hacia la cuenca media del Río Virilla cercana a la ciudad capital.

## **6.2 Recomendaciones**

1. Se recomienda que, para la elaboración de un diseño definitivo del trasvase, se densifiquen las mediciones directas con equipos GNSS en los puntos de toma y las líneas de conducción, para obtener en la zona de estudio, precisiones en el rango de los centímetros.

2. Realizar mayor cantidad de mediciones del caudal en el sitio de aforos durante períodos de tiempo más extenso, abarcando las dos estaciones climatológicas de la zona, con la finalidad de verificar las posibles variaciones de caudal a través del tiempo, principalmente en la época seca. Además, determinar la posibilidad de utilizar las aguas de algunos ríos y quebradas que atraviesan el conducto de agua en algunas rutas, con la finalidad de aumentar el caudal disponible.

3. Instrumentar la subcuenca con estaciones hidrometeorológicas tipo B y pluviográficas, para tener registro histórico de datos, lo cual concluirá en la caracterización y calibración de modelos de precipitación, escorrentía y evaporación, que serán útiles en el análisis de cualquier proyecto hidrológico en el cauce del Río Patria.

4. Realizar estudios de suelos, geológicos (fallas, mantos acuíferos, entre otros), ambientales y afectación urbana en las líneas de conducción, para contar con mayor información para un adecuado diseño del trasvase y un cálculo de costos.

5. Actualizar al año 2017 el déficit de agua potable en el sistema de abastecimiento de la GAM.

6. Darle protección especial a la zona alta de la subcuenca del Río Patria, para asegurar la calidad del agua que a la fecha muestra.

7. Y, en forma general, después de establecer la viabilidad topográfica e hidrológica del trasvase hecha con esta investigación, quizás la **más importante recomendación** dirigida a las futuras generaciones es realizar las modificaciones legales con el fin de

permitir la extracción de agua, con sus implicaciones constructivas, del Parque Nacional Braulio Carrillo dentro del concepto de un desarrollo sostenible.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alcántara García, D. A. (2007). *Topografía y sus aplicaciones*. México D.F: Grupo Editorial Patria.

Ambiente, I. T. (2011). *Manejo integrado de Cuencas Hidrográficas*. Hunacayo, Peru.

Bannister, A., & Baker, R. (1994). *Solving problems in surveying*.

Berné Valero, J. L., Anquela Julián, A. B., & Garrido Villén, N. (2014). *GNSS GPS: fundamentos y aplicaciones en Geomática* (Primera ed.). Valencia, España: Universitat Politècnica de Valencia.

Brenes, Á., & Saborío, V. F. (1995). *Elementos de Climatología: su aplicación didáctica a Costa Rica*. San José: Euned.

Brenes, G., & González, C. (1993). *Geología, Geomorfología, Hidrografía, Suelos y Clima. Pp. sp. En: Propuesta Plan de Manejo Parque Nacional Braulio Carrillo*. San José: Universidad de Costa Rica.

Buelta Serrano, A., & Martínez, R. (2011). *Guía básica de control de calidad del agua*. Madrid, España: ONGAWA Ingeniería para el Desarrollo Humano.

Camacho, J. (1997). *Máster, Enciclopedia Temática - Geografía y Atlas*. Bogotá: Educar.

Carranza, A. M. (2016). *Climatología*. San Jose: Universidad Estatal a Distancia. Recuperado el Noviembre de 2017

David Ramos, B. M. (17 de Abril de 2008). Todo lo que hay que saber del trasvase. Barcelona, Barcelona, España.

Díaz Naranjo, J. D. (30 de Marzo de 2016). *Boletín Meteorológico mensual*. Obtenido de <https://www.imn.ac.cr/documents/10179/355160/MARZO>

Díaz Naranjo, J. D. (Febrero de 2016). *Boletín Meteorológico mensual. Febrero 2016*. Obtenido de <https://www.imn.ac.cr/documents/10179/355160/MARZO>

Farfán, F., Urbina, L., Ferreira, S., & Brandan, M. (2010). Caracterización y Red de Drenaje de la Subcuenca del Río Tin-Tin, PN. Los Cardones, Salta. *Ciencia*, 7-21.

- Gamez Morales, W. (2009). *Texto básico de hidrología*. Nicaragua: Universidad Nacional Agraria.
- Gómez Morales, W. R. (2015). *Texto básico autoformativo de topografía general* (Primera ed.). Managua, Nicaragua: Universidad Nacional Agraria.
- Heuveldop, J., Pardo, J., Quirós, S., & Espinoza, L. (1986). *Agroclimatología Tropical*. San José: UNED.
- Hidalgo, C. (03 de abril de 2018). Información sobre el tanque de almacenamiento de Tibás. (J. Alfaro Morera, & L. A. Campos Pérez, Entrevistadores)
- Hispagua. (1994). *Trasvases En America*. Madrid: Centro de Estudios Hidrograficos.
- IMN-CRRH. (2008). *Clima, variabilidad y cambio climático en Costa Rica*. San José, Costa Rica: Instituto Meteorológico Nacional, Comité Regional de Recursos Hidráulicos.
- Instituto Costarricense de Electricidad. (2016). *Estudio de factibilidad: Quinta Etapa de Abastecimiento al Acueducto Metropolitano*. San José, Costa Rica.
- Instituto Meteorológico de Costa Rica. (03 de Marzo de 2017). *Página oficial IMC-Atlas climatológico de Costa Rica*. Obtenido de <https://www.imn.ac.cr/39>
- Instituto Meteorológico de Costa Rica. (23 de Marzo de 2017). Resumen del pronóstico climático para el 2017. San José, Costa Rica.
- Instituto Meteorológico Nacional & Comité Regional de Recursos Hidráulicos. (2008). *El Clima, variabilidad y cambio climático en Costa Rica*. San José.
- Instituto Meteorológico Nacional. (2010). Atlas Climatológico. Costa Rica.
- Instituto Meteorológico Nacional. (2015). Recuperado el 10 de Junio de 2018, de <https://www.imn.ac.cr/documents/10179/28160/%23%2078>
- Instituto Meteorológico Nacional. (2015). *El ENOS y sus efectos en Costa Rica*. Recuperado el 15 de Junio de 2018, de <https://www.imn.ac.cr/documents/10179/37774/8-EL+ENOS+Y+SUS+EFECTOS+EN+COSTA+RICA.pdf/f8428009-149b-4395-b38a-af231350baac>
- Instituto Meteorológico Nacional. (03 de Marzo de 2017). *Costa Rica Programa de Cambio Climático*. Obtenido de [cglobal.imn.ac.cr/sobre-nosotros](http://cglobal.imn.ac.cr/sobre-nosotros)

- Instituto Meteorológico Nacional. (14 de Abril de 2017). *El Clima y las Regiones Climáticas de Costa Rica*. Recuperado el 14 de 04 de 2017, de <https://www.imn.ac.cr/documents/10179/31165/clima-regiones-climat.pdf/cb3b55c3-f358-495a-b66c-90e677e35f57>
- Krakiwsky, E., & Wells, D. (1978). *Sistemas de Coordenadas en Geodesia*. Canada: INEGI.
- Ley No. 6084. Ley del Servicio de Parques Nacionales. (1977). San José, Costa Rica.
- López Cualla, R. (2003). *Elementos de Diseño de Acueductos y Alcantarillados*. Bogotá, Colombia: Escuela Colombiana de Ingeniería.
- López Jimeno, C. (1998). *Ingeo Túneles*. Madrid, España: Entorno Gráfico.
- Marsden, J. E., & Tromba, A. (1988). *Calculo Vectorial*. California: W.H. Freeman and Company , New York 1998. Obtenido de Calculo vectorial: <http://portales.puj.edu.co/objetosdeaprendizaje/Online/OA04/Contenido%20Calculo.htm>
- Meléndez Carranza, A. (2015). *Climatología*. San José: Euned.
- Melgarejo, J. M. (2009). La eficiencia energética en el trasvase. *Cuaderno Interdisciplinar de Desarrollo Sostenible*, 173-193.
- Merino, M., & Perez, J. (2012). *Coordenadas*. Recuperado el 16 de Abril de 2017, de *Coordenadas*: <http://definicion.de/coordenada>
- Mijares, A. (1971). *Longitud y Latitud*. Venezuela: Ediciones Horizonte.
- MINAE, SINAC & ACCVC. (2005). *Plan de Manejo Parque Nacional Braulio Carrillo*. San José, Costa Rica.
- Mojica, I. (1978). *Influencia de la Cobertura Boscosa en el Régimen Hidrológico de las Cuencas*. Panamá.
- Moreno, V. M. (2004). *Enciclopedia temática ilustrada la aventura del conocimiento*. Bogotá: Norma.
- Muñoz, M. A. (2015). *Arista Sur*. Obtenido de Arista SUR: <http://www.aristasur.com/contenido/sistema-de-coordenadas-geograficas-longitud-y-latitud>

- Nanía, L. S., & Gómez Valentín, M. (2006). *Ingeniería Hidrológica*. Granada: Grupo Editorial Universitario.
- NASA - National Aeronautics and Space Administration. (2017). *Visible Earth*. Recuperado el 20 de Mayo de 2017, de <http://visibleearth.nasa.gov/>
- Oficialización de la Red Geodésica Nacional de Referencia Horizontal CR05 y de la Proyección Transversal de Mercator para Costa Rica CRTM05. (2007). San José, Costa Rica: Decreto Ejecutivo 33797-MJ-MOPT.
- Oficina Regional de Ciencia para América Latina y el Caribe de la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura. (2007). *Balance Hídrico Superficial de Costa Rica 1970-2002*. Montevideo: Documentos Técnicos del PHI-LAC.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (03 de 03 de 2017). *Página oficial FAO*. Obtenido de [http://www.fao.org/nr/water/aquastat/countries\\_regions/cr/indexesp.stm](http://www.fao.org/nr/water/aquastat/countries_regions/cr/indexesp.stm)
- Organización Mundial de la Salud. (2006). *Guías para la calidad del agua potable. Vol. 1: Recomendaciones* (Tercera ed.). Ginebra, Suiza: Ediciones de la Organización Mundial de la Salud.
- Pérez Alfaro, A. (12 de Junio de 2018). Entrada en operación de proyectos del AyA-GAM. (J. Alfaro Morera, & L. A. Campos Pérez, Entrevistadores)
- Pérez Zabaleta, A. (2015). Los trasvases, una respuesta al déficit de recursos hídricos. *Aquae Fundación*.
- Porras Velázquez, J. P. (2017). Tema 1: Elementos Introdutorios (Notas del curso IC 0808 Hidrología). San José, Costa Rica: Universidad de Costa Rica.
- Programa Estado de la Nación. (2009). Decimoquinto Informe Estado de la Nación en Desarrollo Humano Sostenible. Situación del Recurso Hídrico. San José, Costa Rica: Estado de la Nación.
- Ramírez, P. (1976). *Cálculo de la evaporación y evapotranspiración en Costa Rica. Tesis de Licenciatura*. San José: Universidad de Costa Rica.
- Recio, P. (16 de 02 de 2017). 450.000 personas de la GAM pasarían sin agua hasta 12 horas al día en esta época seca. *La Nación*, págs.

[http://www.nacion.com/nacional/servicios-publicos/cortes-agua-GAM\\_0\\_1616238412.html](http://www.nacion.com/nacional/servicios-publicos/cortes-agua-GAM_0_1616238412.html).

Reglamento de la Calidad de Agua Potable. (2005). San José, Costa Rica.: Decreto N° 32327-S.

Reglamento para la Evaluación y Clasificación de la Calidad de Cuerpos de Agua N° 33903-MINAE-S. (2007). San José, Costa Rica.

Revista iAgua. (2018). Recuperado el 17 de Junio de 2018, de <https://www.iagua.es/trasvases>

Rivera, N. (2003). *La Situación del Manejo de cuencas en Costa Rica*. San Jose, Costa Rica.

Rocha Felices, A. (2007). *Hidráulica de Tuberías y Canales*. Lima, Perú: Universidad Nacional de Ingeniería.

San Martin Gonzalez, E. (2011). *Un análisis económico de los trasvases de agua intercuenas: El trasvase Tajo-Segura*. Madrid: Aquae-Tesis.

Secretaría de Comunicaciones y Transportes de México. (2016). *Manual de Diseño y Construcción de Túneles de Carretera*. Ciudad de México: Dirección General de Servicios Técnicos.

Serrano Pacheco, A. (2016). *Notas del Curso Hidrología*. San José: Escuela Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica.

Sokolov, A., & Chapman, T. (1981). *Métodos de cálculo de balance hídrico. Guía internacional de investigación y métodos*. (R. Heras, Trad.) Madrid: Instituto de Hidrología de España y UNESCO.

Solís Blanco, I. (2016). *Proyección de oferta y demanda del acueducto metropolitano AyA con la integración de la Ampliación del Acueducto Metropolitano-Sistema Patarrá (Orosí II)*. San José: Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados.

Soto Garcia M, M. A. (2014). *El Regadío en la Región de Murcia. Caracterización y análisis mediante indicadores de gestión*. España: Sindicato Central de Regerntes del Acueducto Tajo-Segura.

- Soto Saavedra, P. (2004). *Construcción de Túneles*. Valdivia, Chile: Tesis para optar por el grado de Constructor Civil de la Facultad de Ciencias de la Ingeniería, Universidad Austral de Chile.
- Soto, M. (06 de 01 de 2017). El 2016 fue el año más caliente de la historia. *La Nación*, págs. [http://www.nacion.com/vivir/ambiente/caliente-historia-toda-culpa-Nino\\_0\\_1608039257.html](http://www.nacion.com/vivir/ambiente/caliente-historia-toda-culpa-Nino_0_1608039257.html).
- Tapia Gómez, A. (2005). *Topografía Subterránea*. Catalunya, España: UPC.
- Tribunal Latinoamericano del Agua. (03 de Marzo de 2011). *Conflictos hídricos en Costa Rica: Devenir de una ética exigente hacia posibles soluciones*. Obtenido de <http://tragua.com/wp-content/uploads/2012/06/INFORME-COSTA-RICA-MAYO-2011.pdf>
- UNESCO. (2007). *Balance hídrico superficial de Costa Rica*. San José: Programa Hidrológico Internacional(PHI).
- UNESCO. (2017). *Agua para todos, agua para la vida*. Paris: United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization.
- Valverde, J. C. (1998). *Riego y Drenaje*. San José: EUNED.
- Velazquez Porras, J. P. (2016). *Notas de curso Hidrología*. San José: Universidad de Costa Rica, Escuela Ingeniería Civil.
- Villón Béjar, M. (2004). *Hidrología*. Cartago: Editorial Tecnológica de Costa Rica.
- Villón Béjar, M. (2006). *Hidrología Estadística*. Cartago: Editorial Tecnológica de Costa Rica.
- Wolf, P. R., & Ghilani, C. D. (2008). *Topografía* (Undécima ed.). México: Alfaomega.
- Worldometers. (03 de Marzo de 2017). *Estadísticas mundiales en Tiempo Real*. Obtenido de <http://www.worldometers.info/>
- Yuki, I. (2011). *Sistema Tridimensional*. Obtenido de Sistema Tridimensional: [http://sistematridimensional6a.blogspot.com/2011/02/sistemas-tridimensionales\\_28.html](http://sistematridimensional6a.blogspot.com/2011/02/sistemas-tridimensionales_28.html)
- Zárate, E. (1978). *Principales sistemas de viento que afectan a Costa Rica y sus relaciones con la precipitación. Tesis de Licenciatura*. San José: Universidad de Costa Rica.

Zuñiga, C., & Hernández, Z. (2010). *Tesis para optar por el grado de Licenciatura en Geografía Física*. Heredia: UNA.

## ANEXOS

### Anexo 1. Memoria de cálculo

A continuación, se presenta una serie de cálculos que respalda los resultados obtenidos y presentados anteriormente para la caracterización de la subcuenca en estudio. A manera de ejemplo se operarán los datos encontrados mediante la delimitación automatizada de la cuenca Chirripó Pacífico utilizando el programa ArcGis.

Se calcula el índice de compacidad de Gravelius,  $I_G$ , de la siguiente manera:

$$I_G = \frac{1}{2\sqrt{\pi}} \frac{P}{\sqrt{A}} = \frac{1}{2\sqrt{\pi}} \frac{23.46}{\sqrt{20.37}} = 1,47 \quad (13)$$

Ahora, el índice de forma,  $K_f$ , se obtiene mediante la ecuación siguiente:

$$k_f = \frac{B}{L_c} = \frac{A}{L_c^2} = \frac{20.37}{8.27^2} = 0,30 \quad (14)$$

### *Razón de Bifurcación*

Para el número de orden que presenta cada uno de los cauces de la cuenca, se determina la razón de bifurcación. Calculando para el orden  $i = 1$  de la cuenca en estudio, con número de orden  $k = 3$  y cantidad de cauces asociados al orden 1,  $N_1 = 6$ , se obtiene

$$r_b = N_i^{1/k-i} = 6^{1/3-1} = 2.45 \quad (15)$$

### *Densidad de Drenaje*

Este parámetro se determina de la siguiente manera

$$D_d = \frac{\sum L_i}{A} = \frac{19.65}{20.37} = 0,965 \text{ km/km}^2 \quad (16)$$

## Anexo 2. Estimación del coeficiente hidráulico de rugosidad (Cowan)

1. Estimar la “n” básica (coeficiente de rugosidad básico), la cual predomina a lo largo de todo el tramo cuando el río está en un nivel bajo, básico o normal, y va a variar debido a los factores modificantes. Esta va a tener un valor específico según el material del cual está constituido el canal principal, margen derecha y margen izquierda, que puede ser en tierra, en roca, en grava fina o en grava gruesa.

Se toma como grava fina las piedras de tamaño pequeño que ocupan espacios insignificantes y se encuentran en constante movimiento debido al flujo del agua. Por otro lado, se entiende como grava gruesa las piedras de gran tamaño que ocupan espacios extensos y que el cauce del río no logra mover.

2. Se determina con la observación, los factores modificantes los cuales son:

2.1. Selección del valor modificante para la irregularidad superficial de las paredes y el fondo. Es considerada primero en relación al grado de suavidad de la superficie que puede esperarse en el material natural involucrado y segundo con respecto a las profundidades del flujo en consideración.

Cuadro 20. Irregularidad superficial y características.

Grado de Irregularidad	Superficies comparables a:	Valor Modificante
Suave	Lo mejor que puede esperarse para el material involucrado. Es decir, si el material fuese roca se esperaría que esté bien pulida para que permita un fluido paso del agua, sin obstáculo alguno o deformación en la misma.	0.000
Menor	Canal bien dragado, ligeramente erosionado o con las paredes con pendientes socavadas o canales de drenaje.	0.005
Moderado	Canales de regular a pobremente dragados, moderadamente enlodados, paredes de canales o cauces de drenajes moradamente	0.010

Grado de Irregularidad	Superficies comparables a:	Valor Modificante
	enlodados o erosionados.	
Severo	Bancos de corrientes naturales muy enlodados, paredes de canales muy erosionados, sin forma, canales excavados en rocas y de superficies puntiagudas e irregulares.	0.020

## 2.2 Selección del valor modificante para las variaciones en forma y tamaño de la sección transversal.

Los cambios en tamaño entre las secciones transversales deben ser de pequeños a nulos. Los cambios de considerable magnitud, si son graduales y uniformes, no causan turbulencia significativa. Las grandes turbulencias están asociadas con secciones alternadas grandes y pequeñas donde los cambios son abruptos. El grado del efecto de cambios de tamaño depende en primer lugar de la frecuencia con que las secciones grandes y pequeñas se alternan y segundo en la magnitud de los cambios.

En las variaciones de forma se considera el grado al cual los cambios causan la mayor profundidad de flujo al moverse de lado a lado el canal. Los que causan la máxima turbulencia son aquellos que producen traslados del flujo principal de lado a lado en distancias lo suficientemente cortas para producir corrientes parásitas y contracorrientes en la porción poco profunda en estas secciones donde la máxima profundidad de flujo está cerca de algunos de los lados.

Cuadro 21. Características de la variación en forma y tamaño de las secciones.

Características de variación de tamaño y forma de las secciones transversales	Valor Modificante
Cambio de tamaño o forma que ocurre gradualmente. (que el tamaño no cambie abruptamente, sino que se vaya modificando poco a poco a lo largo del tramo)	0.000
Secciones grandes o pequeñas alternando ocasionalmente. Cambios en forma que causan traslados ocasionales del flujo principal de lado a lado.	0.005
Secciones grandes y pequeñas alternando frecuentemente. Cambios de forma que causan traslados frecuentes del flujo principal de lado a lado.	0.010 a 0.015

### 2.3. Selección del valor modificante para obstrucciones

La selección es basada en la presencia y características de las obstrucciones tales como depósitos de restos de rocas, troncos de árboles, raíces expuestas, piedras grandes y troncos de árboles caídos y podridos. Hay que tomar en cuenta que las condiciones consideradas en otros pasos no son reevaluadas o tomadas en cuenta en este paso. Según el efecto de las obstrucciones hay que considerar:

- a. El grado al cual las obstrucciones ocupan o reducen el área promedio de la sección transversal.
- b. El carácter de las obstrucciones (objetos con bordes afilados o angulares inducen mayor turbulencia que objetos curvados, los cuales presentan una forma más aerodinámica al paso del agua).
- c. La posición y el espaciamiento de las obstrucciones transversales y longitudinales en el tramo considerado.

Cuadro 22. Valor modificante para obstrucciones.

Efecto relativo de las obstrucciones	Valor Modificante
Despreciable	0.000
Menor	0.010 a 0.015
Apreciable	0.020 a 0.030
Severo	0.040 a 0.060

#### 2.4. Selección del Valor Modificante para la vegetación

La vegetación afecta el flujo del agua debido a que provoca turbulencia cuando este pasa alrededor y entre las ramas, troncos y follaje, además, se ve modificado el paso de la corriente por la reducción de la sección transversal que la vegetación causa. A medida que la profundidad y velocidad del flujo aumentan, la fuerza del agua tiende a doblar la vegetación.

Es necesario tomar en cuenta las siguientes consideraciones, para poder juzgar que tanto afecta la vegetación:

- a. Altura en relación a la profundidad del flujo.
- b. Capacidad para resistir doblamientos
- c. Grado al que la sección transversal es ocupada o bloqueada.
- d. La distribución transversal y longitudinal de la vegetación de diferentes tipos.
- e. Densidad y altura dentro del tramo en consideración.

Cuadro 23. Valor modificante para la vegetación.

Condiciones de vegetación y flujos comparables a:	Grado de efecto en "n"	Rango del valor modificante
Crecimiento denso del zacate flexible o hierbas, donde el promedio de la profundidad del flujo es el doble o más veces la altura de la vegetación. Pequeños árboles flexibles o dóciles.	Bajo	0.005 a 0.010
Zacate o hierbas donde el	Mediano	0.010 a 0.025

Condiciones de vegetación y flujos comparables a:	Grado de efecto en "n"	Rango del valor modificante
<p>promedio de la profundidad de flujo es de una o dos veces la altura de la vegetación. Zacate con tallo, hierbas, árboles pequeños y matorrales moderadamente densos.</p> <p>Zacate donde el promedio de la profundidad de flujo es aproximadamente igual a la altura de la vegetación. Árboles frondosos de mediana altura.</p>	Alto	0.025 a 0.050
<p>Zacate donde la profundidad promedio del flujo es menor que la mitad de la altura de la vegetación. Árboles frondosos de mayor tamaño.</p>	Muy alto	0.050 a 0.100

## 2.5. Determinación del valor modificante para los meandros de un canal

El valor modificante para los meandros puede ser estimado como:

- a. Se calcula el subtotal ( $n_s$ ) de la suma de la "n" básica con los demás valores modificantes.
- b. Se determina la razón en que está la longitud del meandro en el canal con respecto al tramo de longitud recta del mismo, a partir del siguiente cuadro:

Cuadro 24. Valor modificante para los meandros.

Razón de la longitud del meandro con respecto a la longitud recta del tramo	Grado de meandro	Valor modificante
1.0 a 1.2	Menor	0.000
1.2 a 1.5	Apreciable	0.150 n <sub>s</sub>
1.5 y mayor	Severo	0.300 n <sub>s</sub>

Anexo 3. Datos de precipitación de la Estación Meteorológica Cerro Zurquí

Año/Mes	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Total anual
1989					532.4	451.6	765.5	555.6	456.2	845.8	654.3	936.0	5197
1990	501.2	181.2	558.0	276.6	642.8	445.3	523.3	419.5	435.4	660.5	744.2	895.8	6284
1991	162.4	488.3	225.2	376.9					415.1	498.5	1122.4	490.3	3779
1992	474.1	359.9	427.5	513.0	435.2	246.6	612.8	673.4	574.2	543.2	379.4	346.9	5586
1993	695.8	329.6	641.4	203.2	440.5	397.2	699.7	544.0	673.6	364.5	337.8	688.5	6016
1994	330.8	217.1	286.4	398.2	561.9	394.3	642.2	775.1	410.0	434.7	525.8	541.2	5518
1995	392.0	606.1	357.8	376.7	460.8	442.6	503.5	505.1	512.4	449.4	488.8	315.6	5411
1996	696.0	1362.1	296.3	412.2	788.7	520.1	446.1	543.0	429.7	433.2	601.6	969.7	7499
1997	471.9	1048.3	568.8	206.9	1141.2	542.5	701.6	762.1	536.3	751.5	841.1	804.2	8376
1998	172.6	87.5	761.3	423.5	605.1	632.0	759.8	442.0	530.0	416.5	944.8	1348.5	7124
1999	542.9	426.9	514.0	547.3	447.5	547.7	379.0	525.4	501.5	748.4	877.3	1645.4	7703
2000	1576.9	827.6	273.9	728.6	649.1	689.5	809.0	517.3	549.2	791.6	466.8	561.8	8441
2001	1193.6	389.6	342.6	763.2	452.2	590.3	589.2	804.3	471.9	431.5	1651.9	985.1	8665
2002	1027.6	402.1	540.4	343.6	1232.6	476.7	815.5	1099.1	458.1	453.5	491.4		7341
2003	1201.9	347.0	306.8	615.4	806.8	490.1	651.2	459.2	517.7	658.8	908.3	1663.8	8627
2004	563.1	725.2	702.9	774.7	909.4	565.6	439.6	511.0	467.8	412.6	1367.2	1240.0	8679
2005	1832.9	769.6	142.5	694.1	464.2	358.2	350.6	403.7	342.1	96.4	772.8	552.3	6779
2006	1253.4	585.1	647.1	355.0	400.0	545.5	625.3	430.1	447.4	335.5	616.8	744.9	6986
2007	555.2	300.4	438.0	282.9	549.3	249.0	571.2	527.3	616.2	315.1	1278.7	789.4	6473
2008	405.6	236.0	264.4	546.9	438.7	637.6	676.1	581.9	345.7	664.4	1945.9	1038.5	7782
2009	728.4	1103.8	647.3	246.0	356.8	625.5	623.9	682.6	273.6	362.1	1130.0	421.9	7202
2010	1009.0	778.2	810.2	434.8	367.3	681.9	446.3	557.3	639.5	441.9	862.9	1570.7	8600
2011	986.8	570.0	269.9	196.6	401.6	385.9	437.2		260.4	636.8	1044.9	1203.1	6393
Promedio	762.5	551.9	455.6	441.7	594.7	496.2	594.0	586.6	472.3	510.7	872.0	897.9	<b>6977</b>

#### Anexo 4. Mapas de Caracterización de la Subcuenca del Río Patria

## Anexo 5. Datos de aforos del Río Patria

Anexo 5a. Datos de aforo del Río Patria, del día 12/08/17

TIPO DE AFORO		RIO PATRIA										OBSERVO		V = K1 + K2 * G / T													
GURLEY		AFORO DE CORRIENTES CON MOLINETE										ACUNA	K1			0.005											
RICKLY		RIO PATRIA				MOLINETE						SONDEO	K2			0.672											
CABLE		ESTACION		MARCA		RICKLY		ROJAS		APUNTO		CAUDAL				0.971											
VARILLA		NUMERO		NUMERO		CON/PESO		ACUNA		CALCULO		AREA				2.628											
PIGMEO		FECHA		sábado, 12 de agosto de 2017		PUEBA GIRO		ACUNA		LONGITUD		PER MOJ				6.100											
GOLPES		HORA		11:45		12:10		FECHA		ACUNA		RAD HID				6.755											
REVOLUC		ESCALA		0.57		0.57		ANTES		03:43		FECHA		P-med				0.434									
		Q. TEORICO						DESPUES		04:07		13/8/2017		V-med				0.353									
DIST		NIVEL		PROF		OBS		ANG		0.8		0.6		0.4		0.2		VEL.SUP.		PROF		VEL		%Q		Q(I)	
INICIO		AGUA																CORR		VERT							
1	4.90		0.00																0.00	0.00	0.00	0.00					
2	5.00		0.33																0.33	0.53	4.52	0.04					
3	5.40		0.28																0.28	0.37	4.22	0.04					
4	5.80		0.40																0.40	0.30	4.67	0.05					
5	6.20		0.38																0.38	0.29	4.56	0.04					
6	6.60		0.37																0.37	0.26	3.99	0.04					
7	7.00		0.34																0.34	0.19	2.60	0.03					
8	7.40		0.28																0.28	0.13	1.53	0.01					
9	7.80		0.35																0.35	0.18	2.62	0.03					
10	8.20		0.48																0.48	0.24	4.79	0.05					
11	8.60		0.50																0.50	0.43	8.91	0.09					
12	9.00		0.55																0.55	0.47	10.65	0.10					
13	9.40		0.65																0.65	0.47	12.59	0.12					
14	9.80		0.62																0.62	0.42	10.60	0.10					
15	10.20		0.52																0.52	0.42	9.04	0.09					
16	10.60		0.54																0.54	0.63	12.17	0.12					
17	10.90		0.38																0.38	0.33	2.57	0.02					
18	11.00		0.00																0.00	0.00	0.00	0.00					
19																											
20																											
21																											
22																											
23																											
24																											
25																											
26																											
27																											
28																											
29																											
30																											
31																											
32																											
33																											
34																											
35																											
36																											
37																											
OBSERVACIONES																		AFORO									
																		1									

Anexo 5b. Datos de aforo del Río Patria, del día 23/08/17

TIPO DE AFORO		RIO PATRIA												OBSERVO					
GURLEY		AFORO DE CORRIENTES CON MOLINETE												V = K1 + K2 * G / T					
RICKLY 1		RIO PATRIA				MOLINETE				CHAVARRIA									
CABLE		ESTACION				MARCA RICKLY				APUNTO									
VARILLA 1		NUMERO				NUMERO				ACUNA									
PIGMEO		FECHA				CON/PESO				CALCULO									
GOLPES		HORA				PUEBA GIRO				ACUNA									
REVOLUC 1		ESCALA				ANTES				FECHA									
		Q. TEORICO				DESPUES				24/8/2017									
DIST	NIVEL	PROF	OBS	ANG	0.8		0.6		0.4		0.2		VEL.SUP.		PROF	VEL	%Q	Q(I)	
INICIO	AGUA				G/R	T	G/R	T	G/R	T	G/R	T	G/R	T	CORR	VERT			
1	5.90	0.00					0	0							0.00	0.00	0.00	0.00	
2	6.20	0.47					29	51							0.47	0.39	5.39	0.05	
3	6.50	0.39					19	51							0.39	0.26	2.95	0.03	
4	6.80	0.38					24	53							0.38	0.31	3.74	0.04	
5	7.20	0.35					26	52							0.35	0.34	4.12	0.04	
6	7.50	0.39					23	53							0.39	0.30	3.43	0.03	
7	7.80	0.32					22	53							0.32	0.28	2.69	0.03	
8	8.10	0.30					20	54							0.30	0.25	2.26	0.02	
9	8.40	0.32					20	58							0.32	0.24	2.24	0.02	
10	8.70	0.35					18	53							0.35	0.23	2.42	0.02	
11	9.00	0.37					21	51							0.37	0.28	3.09	0.03	
12	9.30	0.42					25	51							0.42	0.33	4.16	0.04	
13	9.60	0.50					33	52							0.50	0.43	6.39	0.06	
14	9.90	0.54					44	52							0.54	0.57	7.65	0.08	
15	10.10	0.57					40	54							0.57	0.50	5.66	0.06	
16	10.30	0.57					40	52							0.57	0.52	5.87	0.06	
17	10.50	0.50					44	52							0.50	0.57	5.66	0.06	
18	10.70	0.53					30	54							0.53	0.38	3.96	0.04	
19	10.90	0.55					31	51							0.55	0.41	5.61	0.06	
20	11.20	0.55					38	51							0.55	0.51	8.24	0.08	
21	11.50	0.55					46	52							0.55	0.60	9.77	0.10	
22	11.80	0.50					40	57							0.50	0.48	4.71	0.05	
23	11.90	0.00					0	0							0.00	0.00	0.00	0.00	
24																			
25																			
26																			
27																			
28																			
29																			
30																			
31																			
32																			
33																			
34																			
35																			
36																			
37																			
OBSERVACIONES																		AFORO	
																		1	

Anexo 5c. Datos de aforo del Río Patria, del día 08/09/17

TIPO DE AFORO		RIO PATRIA										OBSERVO		V = K1 + K2 * G / T													
GURLEY		AFORO DE CORRIENTES CON MOLINETE										ACUNA		K1		0.005											
RICKLY		RIO PATRIA					MOLINETE					SONDEO		K2		0.672											
CABLE		ESTACION		MARCA		RICKLY		URENA		APUNTO		CAUDAL		0.887													
VARILLA		NUMERO		CON/PESO		PUEBA GIRO		ACUNA		ACUNA		AREA		2.048													
PIGMEO		FECHA		viernes, 8 de septiembre de 2017		PUEBA GIRO		ACUNA		CALCULO		LONGITUD		5.950													
GOLPES		HORA		11:26		12:18		ACUNA		ACUNA		PER MOJ		6.620													
REVOLUC		ESCALA		0.56		0.56		ANTES		04:17		FECHA		9/9/2017													
		Q. TEORICO						DESPUES		05:17		FECHA		9/9/2017													
DIST		NIVEL		PROF		OBS		ANG		0.8		0.6		0.4		0.2		VEL.SUP.		PROF		VEL		%Q		Q(l)	
INICIO		AGUA																		CORR		VERT					
1	5.90		0.00																		0.00	0.00	0.00	0.00			
2	6.10		0.42																			0.42	0.38	3.60	0.03		
3	6.30		0.44																			0.44	0.41	4.02	0.04		
4	6.50		0.31																			0.31	0.27	2.33	0.02		
5	6.70		0.38																			0.38	0.16	1.40	0.01		
6	6.90		0.36																			0.36	0.23	1.89	0.02		
7	7.10		0.34																			0.34	0.35	2.66	0.02		
8	7.30		0.32																			0.32	0.25	1.77	0.02		
9	7.50		0.24																			0.24	0.22	1.16	0.01		
10	7.70		0.29																			0.29	0.19	1.23	0.01		
11	7.90		0.30																			0.30	0.23	1.58	0.01		
12	8.10		0.25																			0.25	0.28	1.56	0.01		
13	8.30		0.24																			0.24	0.35	1.88	0.02		
14	8.50		0.32																			0.32	0.36	2.60	0.02		
15	8.70		0.34																			0.34	0.26	1.96	0.02		
16	8.90		0.37																			0.37	0.46	3.81	0.03		
17	9.10		0.37																			0.37	0.59	4.89	0.04		
18	9.30		0.34																			0.34	0.70	5.39	0.05		
19	9.50		0.46																			0.46	0.69	7.16	0.06		
20	9.70		0.39																			0.39	0.58	5.14	0.05		
21	9.90		0.39																			0.39	0.68	5.95	0.05		
22	10.10		0.41																			0.41	0.61	5.66	0.05		
23	10.30		0.41																			0.41	0.65	6.02	0.05		
24	10.50		0.37																			0.37	0.58	4.88	0.04		
25	10.70		0.35																			0.35	0.59	4.63	0.04		
26	10.90		0.34																			0.34	0.63	4.79	0.04		
27	11.10		0.34																			0.34	0.43	3.31	0.03		
28	11.30		0.35																			0.35	0.32	2.54	0.02		
29	11.50		0.37																			0.37	0.33	2.79	0.02		
30	11.70		0.41																			0.41	0.42	3.38	0.03		
31	11.85		0.00																			0.00	0.00	0.00	0.00		
32																											
33																											
34																											
35																											
36																											
37																											
OBSERVACIONES																						AFORO					
																						1					

Anexo 5d. Datos de aforo del Río Patria, del día 21/09/17, parte A

TIPO DE AFORO		RIO PATRIA											OBSERVO		V = K1 + K2 * G / T							
GURLEY		AFORO DE CORRIENTES CON MOLINETE											ACUNA		K1		K2					
RICKLY	1	RIO			PATRIA				MOLINETE				URENA		CAUDAL		0.282					
CABLE		ESTACION			MARCA				RICKLY				APUNTO		AREA		1.406					
VARILLA	1	NUMERO			CON/PESO				PUEBA GIRO				ACUNA		LONGITUD		3.200					
PIGMEO		FECHA			jueves, 21 de septiembre de 2017				ACUNA				CALCULO		PER MOJ		4.002					
GOLPES		HORA			11:05		12:05		ACUNA				RAD HID		0.351							
REVOLUC	1	ESCALA			0.79		0.78		ANTES		03:00		FECHA		P-med		0.474		P-R-E		0.439	
		Q. TEORICO			DESPUES				05:17				22/9/2017		V-med		0.179		V-EQ		0.201	
DIST	NIVEL	PROF	OBS	ANG	0.8		0.6		0.4		0.2		VEL.SUP.		PROF	VEL	%Q	Q(I)				
INICIO	AGUA				G/R	T	G/R	T	G/R	T	G/R	T	G/R	T	CORR	VERT						
1	1.60	0.00					0	0							0.00	0.00	0.00	0.00				
2	1.85	0.20					9	50							0.20	0.13	2.23	0.01				
3	2.10	0.36					10	62							0.36	0.11	3.62	0.01				
4	2.35	0.26					6	53							0.26	0.08	2.37	0.01				
5	2.60	0.33					8	52							0.33	0.11	3.17	0.01				
6	2.85	0.24					8	55							0.24	0.10	2.19	0.01				
7	3.10	0.47					14	54							0.47	0.18	7.47	0.02				
8	3.35	0.60					28	53							0.60	0.36	19.16	0.05				
9	3.60	0.64					20	51							0.64	0.27	15.25	0.04				
10	3.85	0.60					12	54							0.60	0.15	8.21	0.02				
11	4.10	0.56					9	55							0.56	0.11	5.71	0.02				
12	4.35	0.68					13	54							0.68	0.17	10.06	0.03				
13	4.60	0.68					30	54							0.68	0.38	20.54	0.06				
14	4.80	0.00					0	0							0.00	0.00	0.00	0.00				
15																						
16																						
17																						
18																						
19																						
20																						
21																						
22																						
23																						
24																						
25																						
26																						
27																						
28																						
29																						
30																						
31																						
32																						
33																						
34																						
35																						
36																						
37																						
OBSERVACIONES																AFORO						
																1						

Anexo 5d. Datos de aforo del Río Patria, del día 21/09/17, parte B

TIPO DE AFORO		RIO PATRIA										OBSERVO		V = K1 + K2 * G / T					
GURLEY		AFORO DE CORRIENTES CON MOLINETE										ACUNA SONDEO		K1		K2			
RICKLY	1	RIO PATRIA		MOLINETE						URENA		CAUDAL							
CABLE		ESTACION		MARCA		RICKLY		APUNTO		AREA									
VARILLA	1	NUMERO		NUMERO				ACUNA		LONGITUD									
PIGMEO		FECHA		jueves, 21 de septiembre de 2017		CON/PESO		CALCULO		PER MOJ									
GOLPES		HORA		11:05		12:05		PUEBA GIRO		ACUNA									
REVOLUC	1	ESCALA		0.79		0.78		ANTES		03:00		FECHA		22/9/2017					
		Q. TEORICO						DESPUES				P-med		0.423		P-R-E		0.405	
												V-med		0.792		V-EQ		0.845	
DIST	NIVEL	PROF	OBS	ANG	0.8		0.6		0.4		0.2		VEL.SUP.		PROF	VEL	%Q	Q(I)	
INICIO	AGUA				G/R	T	G/R	T	G/R	T	G/R	T	G/R	T	CORR	VERT			
1	5.90	0.00					0	0							0.00	0.00	0.00	0.00	
2	6.20	0.55					32	51							0.55	0.43	3.49	0.07	
3	6.50	0.43					42	59							0.43	0.48	3.09	0.06	
4	6.80	0.48					22	52							0.48	0.29	0.99	0.02	
5	7.10	0.23					27	53							0.23	0.35	1.19	0.02	
6	7.40	0.30					51	51							0.30	0.68	3.02	0.06	
7	7.70	0.28					75	51							0.28	0.99	4.14	0.08	
8	8.00	0.30					24	53							0.30	0.31	1.38	0.03	
9	8.30	0.34					32	51							0.34	0.43	2.16	0.04	
10	8.60	0.45					49	52							0.45	0.64	4.27	0.09	
11	8.90	0.43					65	51							0.43	0.86	5.51	0.11	
12	9.20	0.43					70	51							0.43	0.93	5.93	0.12	
13	9.50	0.50					72	53							0.50	0.92	6.83	0.14	
14	9.80	0.54					85	52							0.54	1.10	8.86	0.18	
15	10.10	0.56					95	51							0.56	1.26	10.47	0.21	
16	10.40	0.54					90	52							0.54	1.17	9.38	0.19	
17	10.70	0.50					95	51							0.50	1.26	9.35	0.19	
18	11.00	0.50					85	52							0.50	1.10	8.21	0.17	
19	11.30	0.46					70	51							0.46	0.93	6.34	0.13	
20	11.60	0.47					70	51							0.47	0.93	5.40	0.11	
21	11.80	0.00					0	0							0.00	0.00	0.00	0.00	
22																			
23																			
24																			
25																			
26																			
27																			
28																			
29																			
30																			
31																			
32																			
33																			
34																			
35																			
36																			
37																			
OBSERVACIONES															AFORO				
															1				

Anexo 5e. Datos de aforo del Río Patria, del día 20/10/17

TIPO DE AFORO		RIO PATRIA										OBSERVO		V = K1 + K2 * G / T				
GURLEY		AFORO DE CORRIENTES CON MOLINETE										ACUNA SONDEO		K1		K2		
RICKLY	1	RIO PATRIA		MOLINETE						SOLANO		CAUDAL						
CABLE		ESTACION		MARCA		RICKLY		APUNTO		AREA								
VARILLA	1	NUMERO		CON/PESO		PUEBA GIRO		ACUNA		LONGITUD								
PIGMEO		FECHA		viernes, 20 de octubre de 2017		CON/PESO		CALCULO		PER MOJ								
GOLPES		HORA		10:52		11:39		ACUNA		RAD HID								
REVOLUC	1	ESCALA		0.46		0.46		FECHA		P-med		P-R-E						
		Q. TEORICO						21/10/2017		V-med		V-EQ						
DIST	NIVEL	PROF	OBS	ANG	0.8		0.6		0.4		0.2		VEL.SUP.		PROF	VEL	%Q	Q(I)
INICIO	AGUA				G/R	T	G/R	T	G/R	T	G/R	T	G/R	T	CORR	VERT		
1	4.55	0.00					0	0							0.00	0.00	0.00	0.00
2	4.60	0.37					90	45							0.37	1.35	3.84	0.06
3	4.80	0.43					90	47							0.43	1.29	6.84	0.11
4	5.00	0.56					90	57							0.56	1.07	7.22	0.12
5	5.20	0.55					55	51							0.55	0.73	4.94	0.08
6	5.40	0.44					65	52							0.44	0.85	4.58	0.07
7	5.60	0.44					48	54							0.44	0.60	3.26	0.05
8	5.80	0.40					48	53							0.40	0.61	3.02	0.05
9	6.00	0.50					54	51							0.50	0.72	4.41	0.07
10	6.20	0.45					40	56							0.45	0.49	2.69	0.04
11	6.40	0.50					45	53							0.50	0.58	3.54	0.06
12	6.60	0.46					42	51							0.46	0.56	3.16	0.05
13	6.80	0.46					32	58							0.46	0.38	2.13	0.03
14	7.00	0.45					20	56							0.45	0.25	1.36	0.02
15	7.20	0.47					22	52							0.47	0.29	1.67	0.03
16	7.40	0.50					55	51							0.50	0.73	4.49	0.07
17	7.60	0.50					55	55							0.50	0.68	4.17	0.07
18	7.80	0.60					85	53							0.60	1.08	8.00	0.13
19	8.00	0.55					22	51							0.55	0.29	2.00	0.03
20	8.20	0.55					24	55							0.55	0.30	2.02	0.03
21	8.40	0.53					22	54							0.53	0.28	1.82	0.03
22	8.60	0.56					45	52							0.56	0.59	4.04	0.07
23	8.80	0.60					95	53							0.60	1.21	8.93	0.15
24	9.00	0.49					80	52							0.49	1.04	6.27	0.10
25	9.20	0.39					90	52							0.39	1.17	5.61	0.09
26	9.40	0.00					0	0							0.00	0.00	0.00	0.00
27																		
28																		
29																		
30																		
31																		
32																		
33																		
34																		
35																		
36																		
37																		
OBSERVACIONES		SECCION MODIFICADA POR LA CRECIENTE DURANTE EL PASO DE LA TORMENTA NATE															AFORO	
		SE OBSERVA GRAN CANTIDAD DE PIEDRAS																
		HAY CAMBIO SUSTANCIAL DE LA SECCION Y DEL PUNTO DE CONTROL															1	

Anexo 5f. Datos de aforo del Río Patria, del día 25/01/18

TIPO DE AFORO		RIO PATRIA										OBSERVO		V = K1 + K2 * G / T				
GURLEY		AFORO DE CORRIENTES CON MOLINETE										ACUNA		K1		0.005		
RICKLY 1		RIO PATRIA		MOLINETE						SONDEO		K2		0.672				
CABLE		ESTACION		MARCA		RICKLY		SOLANO		CAUDAL		2.643						
VARILLA 1		NUMERO		CON/PESO		ACUNA		APUNTO		AREA		4.096						
PIGMEO		FECHA		jueves, 25 de enero de 2018		PUEBA GIRO		CALCULO		LONGITUD		8.700						
GOLPES		HORA		12:05		12:40		ACUNA		PER MOJ		9.147						
REVOLUC 1		ESCALA		0.59		0.585		ANTES 04:20		FECHA		26/1/2018						
		Q. TEORICO						DESPUES 03:56		RAD HID		0.448						
DIST	NIVEL	PROF	OBS	ANG	0.8		0.6		0.4		0.2		VEL.SUP.	PROF	VEL	%Q	Q(I)	
INICIO	AGUA				G/R	T	G/R	T	G/R	T	G/R	T	G/R	T				
1	3.30	0.00					0	0							0.00	0.00	0.00	0.00
2	3.50	0.43					40	45							0.43	0.60	3.43	0.09
3	4.00	0.48					35	40							0.48	0.59	5.39	0.14
4	4.50	0.32					42	42							0.32	0.68	8.58	0.23
5	5.00	0.67					48	41							0.67	0.79	10.04	0.27
6	5.50	0.75					53	49							0.75	0.73	10.38	0.27
7	6.00	0.73					44	42							0.73	0.71	9.79	0.26
8	6.50	0.66					45	42							0.66	0.73	9.05	0.24
9	7.00	0.72					45	42							0.72	0.73	9.88	0.26
10	7.50	0.65					58	42							0.65	0.93	11.47	0.30
11	8.00	0.40					44	41							0.40	0.73	5.50	0.15
12	8.50	0.50					40	42							0.50	0.65	6.10	0.16
13	9.00	0.44					22	41							0.44	0.37	3.04	0.08
14	9.50	0.42					26	42							0.42	0.42	3.35	0.09
15	10.00	0.36					21	42							0.36	0.34	2.32	0.06
16	10.50	0.20					14	43							0.20	0.22	0.85	0.02
17	11.00	0.16					12	45							0.16	0.18	0.84	0.02
18	12.00	0.00					0	0							0.00	0.00	0.00	0.00
19																		
20																		
21																		
22																		
23																		
24																		
25																		
26																		
27																		
28																		
29																		
30																		
31																		
32																		
33																		
34																		
35																		
36																		
37																		
OBSERVACIONES														AFORO				
														1				

Anexo 5g. Datos de aforo del Río Patria, del día 20/03/18

TIPO DE AFORO		RIO PATRIA											OBSERVO		V = K1 + K2 * G / T															
GURLEY		AFORO DE CORRIENTES CON MOLINETE											URENA		K1		K2													
RICKLY 1		RIO PATRIA			MOLINETE								SONDEO		CAUDAL		AREA													
CABLE		ESTACION			MARCA		RICKLY						SOLANO		LONGITUD		PER MOJ													
VARILLA 1		NUMERO			CON/PESO		PUEBA GIRO						ACUNA		RAD HID															
PIGMEO		FECHA			10:10		10:55		04:00		FECHA		P-med		0.343		P-R-E		0.321											
GOLPES		HORA			04:25		04:25		04:10		27/3/2018		V-med		0.542		V-EQ		0.565											
REVOLUC 1		ESCALA			0.425		0.425		04:10		27/3/2018																			
		Q. TEORICO																												
DIST		NIVEL		PROF		OBS		ANG		0.8		0.6		0.4		0.2		VEL.SUP.		PROF		VEL		%Q		Q(I)				
INICIO		AGUA								G/R		T		G/R		T		G/R		T		G/R		T		G/R		T		
1	3.30		0.00																		0.00	0.00	0.00	0.00						
2	3.70		0.40																			0.40	0.40	5.55	0.06					
3	4.10		0.40																			0.40	0.31	4.29	0.05					
4	4.50		0.30																			0.30	0.72	9.84	0.11					
5	4.90		0.40																			0.40	0.73	9.98	0.12					
6	5.30		0.45																			0.45	0.73	11.25	0.13					
7	5.70		0.40																			0.40	0.71	9.82	0.11					
8	6.10		0.40																			0.40	0.85	11.63	0.14					
9	6.50		0.25																			0.25	0.76	6.55	0.08					
10	6.90		0.45																			0.45	0.62	9.54	0.11					
11	7.30		0.43																			0.43	0.37	5.54	0.06					
12	7.70		0.33																			0.33	0.52	5.88	0.07					
13	8.10		0.33																			0.33	0.35	4.00	0.05					
14	8.50		0.23																			0.23	0.36	2.88	0.03					
15	8.90		0.14																			0.14	0.35	1.70	0.02					
16	9.30		0.13																			0.13	0.35	1.55	0.02					
17	9.70		0.00																			0.00	0.00	0.00	0.00					
18																														
19																														
20																														
21																														
22																														
23																														
24																														
25																														
26																														
27																														
28																														
29																														
30																														
31																														
32																														
33																														
34																														
35																														
36																														
37																														
OBSERVACIONES		SECCION MODIFICADA POR LA CRECIENTE DURANTE EL PASO DE LA TORMENTA NATE													AFORO															
		SE OBSERVA GRAN CANTIDAD DE PIEDRAS																												
		HAY CAMBIO SUSTANCIAL DE LA SECCION Y DEL PUNTO DE CONTROL													1															

Anexo 5h. Datos de aforo del Río Patria, del día 23/03/18

TIPO DE AFORO		RIO PATRIA											OBSERVO		V = K1 + K2 * G / T												
GURLEY		AFORO DE CORRIENTES CON MOLINETE											URENA		K1												
RICKLY		RIO		PATRIA				MOLINETE					SONDEO		K2												
CABLE		ESTACION		MARCA		RICKLY			SOLANO		CAUDAL																
VARILLA		NUMERO		NUMERO		APUNTO			URENA		AREA																
PIGMEO		FECHA		viernes, 23 de marzo de 2018		CON/PESO			CALCULO		LONGITUD																
GOLPES		HORA		10:20		10:53		PUEBA GIRO			ACUNA		PER MOJ														
REVOLUC		ESCALA		0.43		0.43		ANTES		04:10		FECHA		RAD HID													
		Q. TEORICO						DESPUES		04:15		27/3/2018		P-med		0.334		P-R-E		0.317							
														V-med		0.563		V-EQ		0.605							
DIST		NIVEL		PROF		OBS		ANG		0.8		0.6		0.4		0.2		VEL.SUP.		PROF		VEL		%Q		Q(I)	
INICIO		AGUA																		CORR		VERT					
1	3.40		0.00																	0.00	0.00	0.00	0.00				
2	3.80		0.36																		0.36	0.32	3.78	0.05			
3	4.20		0.27																		0.27	0.30	2.69	0.03			
4	4.60		0.30																		0.30	0.70	11.61	0.14			
5	5.00		0.50																		0.50	0.76	12.57	0.15			
6	5.40		0.50																		0.50	0.70	11.62	0.14			
7	5.80		0.40																		0.40	0.75	9.90	0.12			
8	6.20		0.40																		0.40	0.83	10.99	0.13			
9	6.60		0.31																		0.31	0.71	7.31	0.09			
10	7.00		0.45																		0.45	0.63	9.34	0.11			
11	7.40		0.32																		0.32	0.45	4.76	0.06			
12	7.80		0.30																		0.30	0.51	5.09	0.06			
13	8.20		0.22																		0.22	0.48	3.47	0.04			
14	8.60		0.18																		0.18	0.48	2.86	0.03			
15	9.00		0.18																		0.18	0.46	2.75	0.03			
16	9.40		0.12																		0.12	0.37	1.27	0.02			
17	9.70		0.00																		0.00	0.00	0.00	0.00			
18																											
19																											
20																											
21																											
22																											
23																											
24																											
25																											
26																											
27																											
28																											
29																											
30																											
31																											
32																											
33																											
34																											
35																											
36																											
37																											
OBSERVACIONES															AFORO												
															1												



Anexo 5j. Datos de aforo del Río Patria, del día 09/04/18

TIPO DE AFORO		RIO PATRIA											OBSERVO		V = K1 + K2 * G / T				
GURLEY		AFORO DE CORRIENTES CON MOLINETE											URENA		K1		K2		
RICKLY 1		RIO PATRIA			MOLINETE				RICKLY		SOLANO		CAUDAL		AREA				
CABLE		ESTACION		MARCA		RICKLY		APUNTO		URENA		LONGITUD		PER MOJ					
VARILLA 1		NUMERO		CON/PESO		CALCULO		ACUNA		RAD HID		P-med		P-R-E					
PIGMEO		FECHA		10:05		10:35		PUEBA GIRO		FECHA		V-med		V-EQ					
GOLPES		HORA		04:70		04:47		ANTES 03:20		17/4/2018		0.383		0.359					
REVOLUC 1		ESCALA		Q. TEORICO		DESPUES						0.636		0.670					
DIST	NIVEL	PROF	OBS	ANG	0.8		0.6		0.4		0.2		VEL.SUP.		PROF	VEL	%Q	Q(I)	
INICIO	AGUA				G/R	T	G/R	T	G/R	T	G/R	T	G/R	T	CORR	VERT			
1	2.50	0.00					0	0							0.00	0.00	0.00	0.00	
2	2.90	0.37					58	58							0.37	0.68	6.50	0.10	
3	3.30	0.30					38	55							0.30	0.47	3.65	0.06	
4	3.70	0.34					66	57							0.34	0.78	9.15	0.14	
5	4.10	0.45					77	57							0.45	0.91	10.66	0.16	
6	4.50	0.54					69	57							0.54	0.82	11.47	0.18	
7	4.90	0.45					70	59							0.45	0.80	9.37	0.14	
8	5.30	0.45					71	59							0.45	0.81	9.50	0.15	
9	5.70	0.44					70	53							0.44	0.89	10.19	0.16	
10	6.10	0.45					63	57							0.45	0.75	8.73	0.13	
11	6.50	0.47					38	57							0.47	0.45	5.53	0.09	
12	6.90	0.38					37	58							0.38	0.43	4.28	0.07	
13	7.30	0.32					26	60							0.32	0.30	2.46	0.04	
14	7.70	0.25					45	57							0.25	0.54	3.47	0.05	
15	8.10	0.20					45	59							0.20	0.52	2.69	0.04	
16	8.50	0.23					34	59							0.23	0.39	2.34	0.04	
17	8.90	0.00					0	0							0.00	0.00	0.00	0.00	
18																			
19																			
20																			
21																			
22																			
23																			
24																			
25																			
26																			
27																			
28																			
29																			
30																			
31																			
32																			
33																			
34																			
35																			
36																			
37																			
OBSERVACIONES																		AFORO	

Anexo 5k. Datos de aforo del Río Patria, del día 19/04/18

TIPO DE AFORO		RIO PATRIA											OBSERVO		V = K1 + K2 * G / T			
GURLEY		AFORO DE CORRIENTES CON MOLINETE											URENA		K1		K2	
RICKLY 1		RIO PATRIA			MOLINETE								SONDEO		CAUDAL		AREA	
CABLE		ESTACION			MARCA		RICKLY						SOLANO		LONGITUD		PER MOJ	
VARILLA 1		NUMERO			CON/PESO		PUEBA GIRO						ACUNA		RAD HID			
PIGMEO		FECHA			10:10		10:37						FECHA		P-med		P-R-E	
GOLPES		HORA			0.470		0.470						20/4/2018		V-med		V-EQ	
REVOLUC 1		ESCALA			0.470		0.470						20/4/2018		0.375		0.352	
		Q. TEORICO													0.623		0.665	
DIST	NIVEL	PROF	OBS	ANG	0.8		0.6		0.4		0.2		VEL.SUP.		PROF	VEL	%Q	Q(I)
INICIO	AGUA				G/R	T	G/R	T	G/R	T	G/R	T	G/R	T	CORR	VERT		
1	2.60	0.00					0	0							0.00	0.00	0.00	0.00
2	3.00	0.37					60	57							0.37	0.71	7.04	0.11
3	3.40	0.30					40	60							0.30	0.45	3.63	0.05
4	3.80	0.34					60	56							0.34	0.73	8.13	0.12
5	4.20	0.42					70	54							0.42	0.88	9.83	0.15
6	4.60	0.62					70	59							0.62	0.80	13.29	0.20
7	5.00	0.45					68	58							0.45	0.79	9.53	0.14
8	5.40	0.45					70	57							0.45	0.83	9.98	0.15
9	5.80	0.45					70	55							0.45	0.86	10.34	0.15
10	6.20	0.45					62	57							0.45	0.74	8.85	0.13
11	6.60	0.34					46	58							0.34	0.54	4.89	0.07
12	7.00	0.40					40	60							0.40	0.45	4.84	0.07
13	7.40	0.33					23	57							0.33	0.28	2.43	0.04
14	7.80	0.20					28	58							0.20	0.33	1.76	0.03
15	8.20	0.23					40	57							0.23	0.48	2.93	0.04
16	8.60	0.20					40	57							0.20	0.48	2.55	0.04
17	9.00	0.00					0	0							0.00	0.00	0.00	0.00
18																		
19																		
20																		
21																		
22																		
23																		
24																		
25																		
26																		
27																		
28																		
29																		
30																		
31																		
32																		
33																		
34																		
35																		
36																		
37																		
OBSERVACIONES																	AFORO	
																	1	

Anexo 5I. Datos de aforo del Río Patria, del día 04/05/18

TIPO DE AFORO		RIO PATRIA											OBSERVO		V = K1 + K2 * G / T															
GURLEY		AFORO DE CORRIENTES CON MOLINETE											URENA		K1															
RICKLY		AFORO DE CORRIENTES CON MOLINETE											SONDEO		K2															
CABLE		RIO			PATRIA				MOLINETE				SOLANO		CAUDAL															
VARILLA		ESTACION			PATRIA				MARCA		RICKLY		APUNTO		AREA															
PIGMEO		NUMERO			PATRIA				NUMERO		RICKLY		URENA		LONGITUD															
GOLPES		FECHA			viernes, 4 de mayo de 2018				CON/PESO		RICKLY		CALCULO		PER MOJ															
REVOLUC		HORA			10:02		10:39		PUEBA GIRO				ACUNA		RAD HID															
		ESCALA			0.430		0.430		ANTES		03:40		FECHA		P-med															
		Q. TEORICO							DESPUES		03:00		6/5/2018		V-med															
DIST		NIVEL		PROF		OBS		ANG		0.8		0.6		0.4		0.2		VEL.SUP.		PROF		VEL		%Q		Q(I)				
INICIO		AGUA								G/R		T		G/R		T		G/R		T		G/R		T		G/R		T		
1	2.60		0.00																		0.00	0.00	0.00	0.00						
2	2.90		0.34																			0.34	0.47	4.08	0.05					
3	3.20		0.30																			0.30	0.47	3.60	0.04					
4	3.50		0.26																			0.26	0.34	2.62	0.03					
5	3.80		0.30																			0.30	0.71	5.48	0.06					
6	4.10		0.24																			0.24	0.85	5.20	0.06					
7	4.40		0.50																			0.50	0.73	9.41	0.11					
8	4.70		0.50																			0.50	0.76	9.68	0.11					
9	5.00		0.42																			0.42	0.73	7.81	0.09					
10	5.30		0.40																			0.40	0.71	7.31	0.09					
11	5.60		0.40																			0.40	0.77	7.88	0.09					
12	5.90		0.37																			0.37	0.74	7.00	0.08					
13	6.20		0.40																			0.40	0.57	5.89	0.07					
14	6.50		0.30																			0.30	0.45	3.43	0.04					
15	6.80		0.43																			0.43	0.57	6.23	0.07					
16	7.10		0.38																			0.38	0.48	4.64	0.05					
17	7.40		0.27																			0.27	0.18	1.22	0.01					
18	7.70		0.27																			0.27	0.43	3.00	0.04					
19	8.00		0.24																			0.24	0.43	2.67	0.03					
20	8.30		0.15																			0.15	0.43	1.64	0.02					
21	8.60		0.17																			0.17	0.28	1.21	0.01					
22	8.90		0.00																			0.00	0.00	0.00	0.00					
23																														
24																														
25																														
26																														
27																														
28																														
29																														
30																														
31																														
32																														
33																														
34																														
35																														
36																														
37																														
OBSERVACIONES		muestras tomadas en las verticales 2.90 ( 1.7 litros) y 4.40 (2.50 litros)													AFORO															
															12															

## Anexo 6. Láminas de dibujo del Levantamiento Hidrográfico







Anexo 7. Láminas de dibujo de las rutas de posibles trasvases de agua

















DATOS DE LA MUESTRA

Solicitante: Ing. Adriana Ibarra  
Muestra: Río Patria  
Fecha de muestreo: Mayo 2018  
Muestreador: Interesado  
Tipo de muestras: Simples

Detalle reporte de resultados

Muestra	Conductividad ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	Sólidos disueltos (ppm)	Color (UPtCo)	pH	Turbidez (NTU)	DBO rango (0-35 mg/l)	Nitrato (mg/l)	Cobre (mg/l)
1	74	37	0	6.81	1.44	ND	0.1	0.08

ND. No detectable <1 mg/l

Ing. Paola Vidal R  
Coordinadora  
Laboratorio de Ingeniería Ambiental