

## **INFORME ESTUDIOS Y DISEÑO DE OBRA**

**Contratación 2022CD-000456-0002400001**

### **SERVICIOS DE INGENIERÍA PARA EL ESTUDIO, DISEÑO, ELABORACIÓN DE PLANOS CONSTRUCTIVOS, PRESUPUESTO, MANO DE OBRA Y MATERIALES PARA ESTABILIZACIÓN DE TALUD EN QUEBRADA RODRÍGUEZ CON ENFOQUE DE GESTIÓN DEL RIESGO DE DESASTRES, DISTRITO POZOS**



Quebrada Rodríguez a nivel de la Ruta Nacional N°310

**Realizado por:**

**River-Ing**  
de Costa Rica S.A.

**Ingeniería Civil  
Hidrología E Hidráulica  
Ingeniería Fluvial**

**Para:**

MUNICIPALIDAD  
**Santa Ana**

**Marzo, 2023**

## Documento de responsabilidad profesional

San José, 3 de marzo de 2023

Ingeniera  
Melanie Ortiz Umaña  
Proceso Riesgo de Desastres  
Municipalidad de Santa Ana

Estimada Ingeniera,

Presento a su consideración el informe de la contratación 2022CD-000456-0002400001 denominado "Estudio, diseño, elaboración de planos constructivos, presupuesto, mano de obra y materiales para estabilización de talud en Quebrada Rodríguez con enfoque de gestión del riesgo de desastres, distrito Pozos".

El estudio fue elaborado por los Ing. Julio Masís Jiménez y la Ing. Adriana Zamora Valerio, basado en la información meteorológica disponible en la zona, el levantamiento topográfico y estudios geotécnicos generados para el proyecto. Como ingeniero experto en el área de geotecnia se contó con el apoyo del Ing. Danilo Jiménez Ugalde.

Asimismo, se empleó como insumo la información SIG disponible en el Geo-portal de la Municipalidad de Santa Ana y los resultados de los informes técnicos "Avance compilado, diseño, planos, presupuesto y fiscalización de la obra para mejorar el sistema pluvial de Calle Loma Vista y estudio hidrológico e hidráulico y gestión del riesgo de la quebrada los Rodríguez" elaborado por Geotécnica S.A. y "Especificaciones técnicas para el elaboración de estudio hidrológico, diseño y construcción de obra fluvial sobre la quebrada Rodríguez, en el distrito Pozos cantón de Santa Ana", elaborado por el consultor D'Geo, ambos informes generados en el año 2021.

Se manifiesta que la información técnico-científica contenida en el estudio es cierta y verídica.

Atentamente,

Ing. Julio Masís Jiménez  
IC-7367

Ing. Adriana Zamora Valerio  
IC- 33908

Ing. Danilo Jiménez Ugalde  
IC-19214

## Contenido

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Documento de responsabilidad profesional .....</b>                     | <b>2</b>  |
| <b>1. Introducción.....</b>   | <b>8</b>  |
| 1.1 Justificación del estudio .....                                       | 8         |
| 1.2 Resumen de resultados y conclusiones del estudio .....                | 8         |
| 1.3 Ubicación .....   | 11        |
| 1.4 Objetivos .....   | 12        |
| 1.4.1 Objetivos generales.....  | 12        |
| 1.4.2 Objetivos específicos.....  | 12        |
| 1.5 Metodología aplicada.....   | 13        |
| 1.6 Registro fotográfico de las condiciones actuales.....                 | 14        |
| <b>2. Caracterización de las cuencas .....</b>                            | <b>22</b> |
| 2.1 Características morfológicas.....                                     | 22        |
| 2.2 Características de pérdidas de precipitación .....                    | 26        |
| 2.2.1 Usos de suelo y número de curva .....                               | 26        |
| 2.2.2 Abstracciones hidrológicas iniciales.....                           | 29        |
| 2.3 Tiempo de concentración de la cuenca .....                            | 30        |
| <b>3. Análisis de datos de precipitación .....</b>                        | <b>32</b> |
| 3.1 Información disponible para el análisis .....                         | 32        |
| 3.2 Distribución temporal de la precipitación .....                       | 34        |
| 3.3 Análisis de frecuencias de la información meteorológica .....         | 34        |
| 3.4 Curva Duración-Precipitación-Frecuencia .....                         | 35        |
| 3.5 Hietogramas de diseño: bloque alterno .....                           | 36        |
| <b>4. Modelación hidrológica: determinación de caudales máximos .....</b> | <b>38</b> |
| 4.1 Hidrogramas con HEC-HMS .....   | 38        |
| 4.2 Método racional .....   | 39        |
| 4.3 Método Mac-Math.....  | 40        |
| 4.4 Caudales por emplear para la modelización .....                       | 41        |
| <b>5. Modelación hidrodinámica .....</b>                                  | <b>42</b> |
| 5.1 Metodología de modelado.....  | 42        |
| 5.2 Resultados de la modelación .....                                     | 42        |
| 5.3 Estimación de la profundidad potencial de socavación.....             | 48        |

|         |  |           |
|---------|--|-----------|
| 5.3.1   | Ecuación de socavación general de Neill.....                             | 48        |
| 5.3.2   | Ecuación de socavación general de Blench .....                           | 48        |
| 5.3.3   | Ecuación de socavación general de Lacey.....                             | 49        |
| 5.3.4   | Método de velocidad competente o limitante para socavación general ..... | 50        |
| 5.3.5   | Perfil de socavación en la quebrada Rodríguez .....                      | 50        |
| 5.4     | Análisis de resultados del modelo hidráulico .....                       | 52        |
| 6.      | Diseño de cabezal de alcantarilla y protección de ladera.....            | 55        |
| 6.1     | Estudio geotécnico .....   | 55        |
| 6.1.1   | Objetivos del estudio geotécnico .....                                   | 56        |
| 6.1.2   | Metodología aplicada .....   | 56        |
| 6.1.3   | Trabajo realizado: perforaciones .....                                   | 56        |
| 6.1.4   | Resultados geotécnicos obtenidos.....                                    | 56        |
| 6.1.5   | Evaluación de resultados y conclusiones geotécnicas .....                | 58        |
| 6.1.5.1 | <i>Arcillas expansivas, limos colapsables o arenas licuables .....</i>   | <i>58</i> |
| 6.1.5.2 | <i>Coefficiente sísmico para el diseño.....</i>                          | <i>58</i> |
| 6.1.5.3 | <i>Análisis de estabilidad ante el deslizamiento.....</i>                | <i>58</i> |
| 6.1.6   | Conclusiones y recomendaciones geotécnicas.....                          | 60        |
| 6.2     | Capacidad de soporte admisible .....                                     | 60        |
| 6.3     | Diseño propuesto.....  | 61        |
| 6.4     | Presupuesto de obra.....   | 66        |
| 7.      | Discusión sobre los grados de incertidumbre y alcance del estudio .....  | 67        |
| 8.      | Fuentes de consulta .....  | 68        |
| 9.      | Anexos.....  | 69        |

## Índice de tablas

|          |  |    |
|----------|--|----|
| Tabla 1. | Ubicación del punto de fin e inicio del proyecto .....   | 11 |
| Tabla 2. | Características de las cuencas bajo estudio .....  | 22 |
| Tabla 3. | Características del uso del suelo para la cuenca .....   | 27 |
| Tabla 4. | Características de las unidades cartográficas en las cuencas bajo estudio .....  | 29 |
| Tabla 5. | Estimación de tiempos de concentración.....  | 32 |
| Tabla 6. | Resumen de la información meteorológica disponible .....   | 33 |
| Tabla 7. | Valores de precipitación acumulada asociados a distintos periodos de para la estación 84169 Aeropuerto Juan Santamaría y 84193 Aeropuerto Pavas Oeste..... | 35 |

|   |    |
|---|----|
| Tabla 8. Intensidades de precipitación en las cuencas según curvas IDF y estación 84169 del IMN ..... | 36 |
| Tabla 9. Resumen de los parámetros usados en HEC-HMS.....   | 38 |
| Tabla 10. Caudales pico para el método de bloque alterno.....   | 38 |
| Tabla 11. Coeficientes de escorrentía de las cuencas estudiadas para el 2023, 2048 y 2073 .....       | 39 |
| Tabla 12. Caudales pico para el método racional .....   | 40 |
| Tabla 13. Caudales pico para el método de Mac-Math.....   | 41 |
| Tabla 14. Factores de ajuste de ecuaciones de socavación.....   | 49 |
| Tabla 15. Resultados de socavación general potencial para TR10 .....                                  | 50 |
| Tabla 16. Perforaciones SPT realizadas .....  | 56 |
| Tabla 17. Perfil geotécnico típico del terreno .....  | 57 |
| Tabla 18. Parámetros geotécnicos inferidos .....  | 57 |
| Tabla 19. Resultados del análisis de estabilidad en la condición actual.....                          | 58 |
| Tabla 20. Presupuesto de construcción estimado para el proyecto.....                                  | 66 |

## Índice de figuras

|  |    |
|--|----|
| Figura 1. Determinación de velocidad de agua en flujo laminar concentrado .....  | 31 |
| Figura 2. Perfil de flujo para las modelaciones de 2, 10, 25, 50,100 y 200 años de periodo de retorno ...  | 43 |
| Figura 3. Niveles máximos en la sección transversal del estacionamiento 0+542.93 (Puente).....   | 44 |
| Figura 4. Niveles máximos en la sección transversal del estacionamiento 0+514.98 (flujo canal abierto)   | 44 |
| Figura 5. Niveles máximos en la sección transversal del estacionamiento 0+503.18 (paso bajo cochera)   | 44 |
| Figura 6. Niveles máximos en la sección transversal del estacionamiento 0+484.00 (flujo a canal abierto costado este parqueo Hospital Metropolitano) ..... | 45 |
| Figura 7. Niveles máximos en la sección transversal del estacionamiento 0+468.97 (Túnel bajo casas) ..   | 45 |
| Figura 8. Niveles máximos en la sección transversal del estacionamiento 0+416.97 (flujo a canal abierto) .....   | 45 |
| Figura 9. Niveles máximos en la sección transversal de los estacionamientos 0+410 y 0+398 (Túnel/alcantarilla a salir a la RN 310) .....                   | 46 |
| Figura 10. Niveles máximos de flujo en la sección transversal del estacionamiento 0+327.97 (flujo libre, aguas abajo RN) .....                             | 46 |
| Figura 11. Perfil de velocidades de flujo para diferentes periodo de retorno .....   | 47 |
| Figura 12. Factor $f_{B0}$ de transporte nulo de Blench.....   | 49 |
| Figura 13. Modelo geotécnico del sitio en estudio .....  | 57 |
| Figura 14. Resultados del análisis de estabilidad.....   | 59 |
| Figura 15. Vista en planta de la solución propuesta .....  | 62 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 16. Vista en planta y frontal del cabezal de descarga.....                     | 63 |
| Figura 17. Cortes transversales con detalle de acero del cabezal de descarga .....    | 64 |
| Figura 18. Vista del conjunto cabezal-protección de lecho con concreto ciclópeo ..... | 65 |
| Figura 19. Protección de talud con un manto de control de erosión Pyramat 25 .....    | 65 |

## Índice de fotografías

|  |    |
|--|----|
| Fotografía 1. Desfogue pluvial existente, calle ramal La Cubilla .....   | 15 |
| Fotografía 2. Entrada quebrada bajo puente contiguo al parqueo del Hospital Metropolitano.....   | 16 |
| Fotografía 3. Paso de quebrada bajo puente contiguo al parqueo del Hospital Metropolitano .....  | 16 |
| Fotografía 4. Cochera bajo la que pasa la quebrada .....   | 17 |
| Fotografía 5. Salida quebrada en túnel bajo cochera.....   | 17 |
| Fotografía 6. Quebrada confinada bajo viviendas entre el Parqueo del Hospital Metropolitano y la salida a la Ruta N°310 .....          | 18 |
| Fotografía 7. Paso del cauce de la quebrada Rodríguez bajo la Ruta Nacional N° 310 .....   | 19 |
| Fotografía 8. Quebrada Rodríguez, cauce a cielo abierto después de la Ruta N° 310 .....  | 20 |
| Fotografía 9. Quebrada Rodríguez en la curva aguas abajo de la Ruta N° 310.....  | 20 |
| Fotografía 10. Estructura de paso en una de las alcantarillas de la cuenca tributaria del desfogue pluvial                             | 21 |
| Fotografía 11. Acumulación de sedimentos en los tragantes pluviales de las líneas que desfogan en calle ramal La Cubilla .....         | 21 |
| Fotografía 12. Daño estructural en el techo del túnel por el que pasa la quebrada contiguo al parqueo del Hospital Metropolitano ..... | 53 |

## Índice de mapas

|  |    |
|--|----|
| Mapa 1. Localización del área de estudio, Pozos, Santa Ana .....                                     | 11 |
| Mapa 2. Ubicación de las fotografías del registro fotográfico .....                                  | 14 |
| Mapa 3. Delimitación y MED de la cuenca de la quebrada Rodríguez y la subcuenca del desfogue pluvial | 23 |
| Mapa 4. Uso de suelos en las subcuencas de la quebrada Rodríguez .....                               | 28 |
| Mapa 5. Ubicación y área de influencia de las estaciones meteorológicas consideradas.....            | 33 |
| Mapa 6. Localización del talud a proteger .....  | 55 |

## Índice de gráficos

|  |    |
|--|----|
| Gráfico 1. Perfil del cauce principal para la cuenca de la quebrada Rodríguez hasta el desfogue pluvial .. | 24 |
|--|----|

---

|   |    |
|---|----|
| Gráfico 2. Curva hipsométrica para la cuenca de la quebrada Rodríguez hasta la Ruta Nacional 310..... | 25 |
| Gráfico 3. Perfil del tramo más largo para la cuenca tributaria del desfogue pluvial .....            | 25 |
| Gráfico 4. Curva hipsométrica para la cuenta tributaria del desfogue pluvial.....                     | 26 |
| Gráfico 5. Acumulados de precipitación en 15 minutos para las estaciones de interés.....              | 34 |
| Gráfico 6. Curva PDF para la estación 84169 Aeropuerto Juan Santamaría .....                          | 36 |
| Gráfico 7. Hietogramas para diferentes periodos de retorno según el método de bloque alterno .....    | 37 |
| Gráfico 8. Hidrogramas modelados con HEC HMS para hasta la RN310 .....                                | 39 |
| Gráfico 9. Perfil de socavación potencial general en la quebrada Rodríguez.....                       | 51 |

## 1. Introducción

Este informe presenta los resultados del estudio **hidrológico, hidráulico y de socavación** sobre la quebrada Rodríguez, en respuesta a la contratación **2022CD-000456-0002400001** denominada **“Servicios de ingeniería para el estudio, diseño, elaboración de planos constructivos, presupuesto, mano de obra y materiales para estabilización de talud en quebrada Rodríguez con enfoque de gestión del riesgo de desastres, distrito Pozos”** promovida por la Municipalidad de Santa Ana.

### 1.1 Justificación del estudio

La necesidad del estudio se origina por los reportes de inundaciones y erosión en los laterales del cauce de la quebrada Rodríguez que afectan a la población del distrito de Pozos de Santa Ana. Tras la visita al sitio se pudo identificar que el cauce está limitado hidráulicamente en varios sectores, pues se encuentra inmerso en una zona urbana. Además, de acuerdo con un estudio anterior, la quebrada no cuenta con capacidad hidráulica para transportar las avenidas máximas y el flujo ha generado erosión y afectación en fincas aledañas.

Debido a esta afectación se requiere estabilizar el talud a la salida del desfogue pluvial de calle ramal Cubilla e intervenir el desfogue actual, proponiendo un cambio en la dirección de salida del flujo pluvial hacia la quebrada. Para elaborar la propuesta de diseño realizó un estudio integral que finalizó con la confección de los planos constructivos de las obras de mejoramiento y estabilización del talud sobre la quebrada y el desfogue pluvial. Todo ello considerando un enfoque de gestión del riesgo para disminuir la afectación de desastres naturales.

Adicionalmente, se solicitó evaluar el comportamiento hidráulico de la quebrada Rodríguez desde el punto de desfogue pluvial de calle La Cubilla hasta 400 m aguas abajo de la intersección de este cuerpo de agua con la Ruta Nacional 310.

### 1.2 Resumen de resultados y conclusiones del estudio

Para efectuar el estudio se efectuó un levantamiento topográfico convencional y se analizó información meteorológica disponible para determinar el hidrograma de diseño de obras. A partir de esta información se efectuó la modelación hidrológica de la cuenca de la quebrada Rodríguez y, posteriormente, se realizó una modelación hidráulica usando el programa HEC-RAS para determinar las velocidades y profundidades de agua para el diseño. Se obtuvieron los parámetros geotécnicos por medio de una perforación SPT en el sitio de interés. Asimismo, se emplearon como

insumos los resultados de dos estudios anteriores realizado por Geotécnica S.A. y D'Geo para la Municipalidad de Santa Ana en el año 2021.

Del análisis hidrológico-hidráulico realizado se puede concluir lo siguiente:

- Los caudales pico de la quebrada Rodríguez hasta el punto de control ubicado 400 m aguas abajo de la RN 310 corresponden a 11.7 m<sup>3</sup>/s, 14.0 m<sup>3</sup>/s, 16.0 m<sup>3</sup>/s, 18.2 m<sup>3</sup>/s, y 20.6 m<sup>3</sup>/s para los periodos de retorno de 10, 25, 50, 100 y 200 años, respectivamente. Los caudales fueron estimados aplicando la metodología de hidrograma unitario en HEC-HMS con número de curva, aplicando los datos de la estación 84169 Aeropuerto Juan Santamaría y un hietograma construido con la metodología de bloque alterno.
- La quebrada Rodríguez no tiene capacidad hidráulica de contener flujos mayores a 12 m<sup>3</sup>/s, es decir, se desbordan todos aquellos caudales asociados a periodos de retorno mayores a 5 años.
- Las velocidades de flujo a lo largo de los 575 m de cauce modelados se encuentran, en general, por debajo de los 5.5 m/s. El punto que presenta mayores velocidades corresponde a la salida de la quebrada Rodríguez a través del paso de alcantarilla que cruza bajo la Ruta 310, donde las velocidades superan los 8 m/s para el periodo de retorno de 200 años. Condición que acrecienta el proceso de socavación al pie de la estructura de alcantarilla.
- El potencial de socavación promedio estimado a lo largo del tramo de 575 m de la quebrada Rodríguez en estudio es de 1.3 m para caudales asociados al periodo de retorno de 10 años, 1.4 m para TR 25 años, 1.0 m para TR 50 años, 1.6 para TR 100 años y 1.8 m para TR 200 años. Esta estimación considera un factor de seguridad de 1.15.
- Es importante resaltar el hecho de que, dadas las características de urbanización de la cuenca de la quebrada Rodríguez, las condiciones de riesgo contra erosión de las márgenes del cauce e inundación de terrenos aledaños no van a poder eliminarse. Al contrario, van a tender a incrementar con el pasar de los años, ello como consecuencia de la tendencia a impermeabilizar sectores que en la actualidad están cubiertos por pastos o bosques, lo que desencadenará mayores volúmenes de escorrentía, incrementando los niveles en la quebrada, misma que como se apreció no tiene espacio para incrementar su área hidráulica puesto que está confinada por infraestructura urbana.

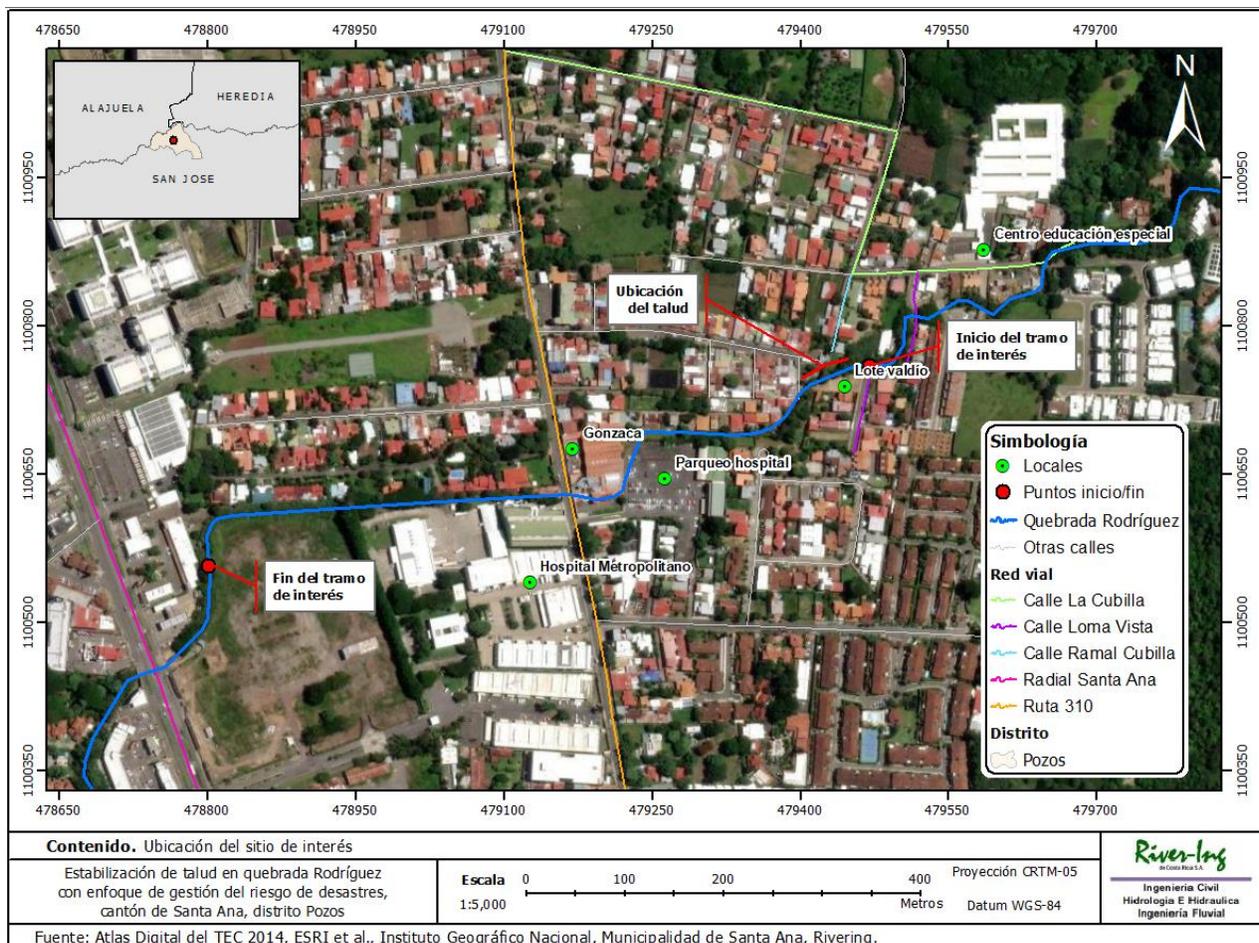
- Con relación a la protección de la margen derecha de la quebrada Rodríguez a la salida del desfogue pluvial de calle Ramal La Cubilla, se concluye lo siguiente:
  - Para la propuesta de obra se efectuó una perforación mediante el método de perforación SPT (Standard Penetration Test, ASTM D-1586). Se detectó el rebote del mazo a una profundidad de 6.6 m. Se detectó un nivel freático a una profundidad de 2.90 m.
  - Se identificaron tres unidades geotécnicas: la UG-01 (17 KN/m<sup>3</sup>) corresponde a un limo arcilloso, con consistencia muy blanda a blanda, la UG-02 (18 KN/m<sup>3</sup>) es un limo arenoso arcilloso con consistencia media, mientras la UG-03 (20 KN/m<sup>3</sup>) corresponde a un limo arenoso con compacidad media a densa y se asocia con el basamento local.
  - El análisis de estabilidad muestra que el perfil analizado se encuentra estable tanto para condición estática, como para la condición dinámica con aceleración pico efectiva de 0.36g, puesto que los factores de seguridad obtenidos son superiores a los mínimos establecidos en la normativa geotécnica nacional vigente.
  - **Se propone** la colocación de un manto de control de erosión tipo Pyramat 25 que cubra una extensión de 7.0 m de longitud y 4.0 m de altura de talud, con anclajes de varilla No. 3 grado 60 y una longitud mínima de anclaje de 0.5 m, distribuyendo dos anclajes por metro cuadrado.
  - **Se propone** la construcción de un cabezal de alcantarilla en concreto armado de 3.5 m de largo, 2.0 de ancho y 1.75 m de alto, con un espesor de pared de 0.25 m. El refuerzo se hará con varilla No. 4 grado 40 a cada 0.15 m en ambas direcciones.
  - Para reducir el riesgo de socavación a la salida del cabezal, **se propone** recubrir el lecho de la quebrada con concreto ciclópeo en una longitud de 2.50 m aguas arriba y aguas abajo medidos de la línea de centro del cabezal, con un espesor de recubrimiento de 0.25 m.

### 1.3 Ubicación

El área en estudio está ubicada en la provincia de San José, en el cantón de Santa Ana, en el distrito de Pozos. Específicamente, se extiende desde 100 m aguas abajo de la intersección de la quebrada Rodríguez con la Calle Loma Vista (C012) y finaliza 400 m aguas abajo de la intersección de la quebrada con la Ruta N° 310, para un total de aproximadamente 800 m. Las coordenadas de inicio y fin del tramo en el sistema de coordenadas CRTM-05 se muestran en la Tabla 1, mientras en el Mapa 1 se aprecia su ubicación espacial.

Tabla 1. Ubicación del punto de fin e inicio del proyecto

| Punto de interés | Este    | Norte     | Distrito | Cantón       | Provincia   |
|------------------|---------|-----------|----------|--------------|-------------|
| <b>Inicio</b>    | 479 470 | 1 100 760 | 03 Pozos | 09 Santa Ana | 01 San José |
| <b>Fin</b>       | 478 800 | 1 100 556 |          |              |             |



Mapa 1. Localización del área de estudio, Pozos, Santa Ana

## 1.4 Objetivos

### 1.4.1 Objetivos generales

- Evaluar hidráulicamente la quebrada Rodríguez en el tramo comprendido entre 250 m aguas abajo de la calle Loma Vista y 400 m aguas abajo de la Ruta N°310, para con ello identificar sitios con riesgo de inundación.
- Diseñar una obra de protección para reducir los problemas de erosión en el talud de margen derecha a nivel de calle ramal La Cubilla.

### 1.4.2 Objetivos específicos

- Efectuar un levantamiento topográfico y de detalles en la quebrada Rodríguez en coordenadas CRTM-05, para el tramo de interés.
- Determinar la distribución temporal y magnitud de las crecidas para los periodos de retorno de 50, 100 y 200 años de periodo de retorno.
- Realizar las modelaciones hidráulicas en HEC-RAS para periodos de retorno de 50, 100 y 200 años en el tramo comprendido entre 250 m aguas abajo de la calle Loma Vista y 400 m aguas abajo de la Ruta N°310.
- Evaluar el riesgo de inundación y socavación en el tramo de interés comprendido entre 250 m aguas abajo de la calle Loma Vista y 400 m aguas abajo de la Ruta N°310.
- Realizar un estudio geotécnico y de estabilidad de taludes para definir las propiedades del suelo para el diseño de una obra de protección en margen derecha de la quebrada Rodríguez en el punto de desfogue pluvial de calle ramal La Cubilla.
- Elaborar una propuesta de diseño con planos constructivos, especificaciones técnicas y presupuesto de la obra de protección lateral en margen derecha de la quebrada Rodríguez y el desfogue pluvial a nivel de calle ramal La Cubilla.

## 1.5 Metodología aplicada

A partir del levantamiento topográfico del sitio de estudio se preparó el modelo de elevación digital del terreno, uno de los insumos principales para la preparación del modelo hidráulico. Además, con la cartografía a escala 1:25 000 del Instituto Geográfico Nacional, se delimitaron las cuencas y demás elementos morfológicos necesarios para su caracterización.

Posteriormente, se identificó la información meteorológica disponible cercana al sitio de estudio. Junto con la información de una tormenta cercana a la zona se procedió a definir el hietograma de diseño, representativo de la cuenca según las condiciones meteorológicas estudiadas. Además, se determinaron los eventos de diseño asociados a periodos de retorno de 2, 25, 50 y 100 años.

Una vez definidos los eventos de diseño, se determinaron los hidrogramas de respuesta asociados a las cuencas por medio de la metodología del número de curva (Natural Resources Conservation Service, 1999) y el hidrograma unitario del Servicio de Conservación de los Recursos Naturales de Estados Unidos (Natural Resources Conservation Service, 2010). También se calcularon caudales pico con el método Racional y el método Mac-Math, para comparar los resultados generados con HEC-HMS.

Los hidrogramas usaron de insumo para la modelación hidráulica unidimensional en HEC-RAS 5.0.7, cuyos resultados permitieron determinar los parámetros de interés para evaluar las condiciones del sitio como velocidades y profundidades. Con base en estos parámetros se estimó el perfil de socavación potencial para el tramo de la quebrada Rodríguez comprendido desde 250 m aguas abajo de la calle Loma vista y hasta 400 m aguas abajo de la Ruta 310.

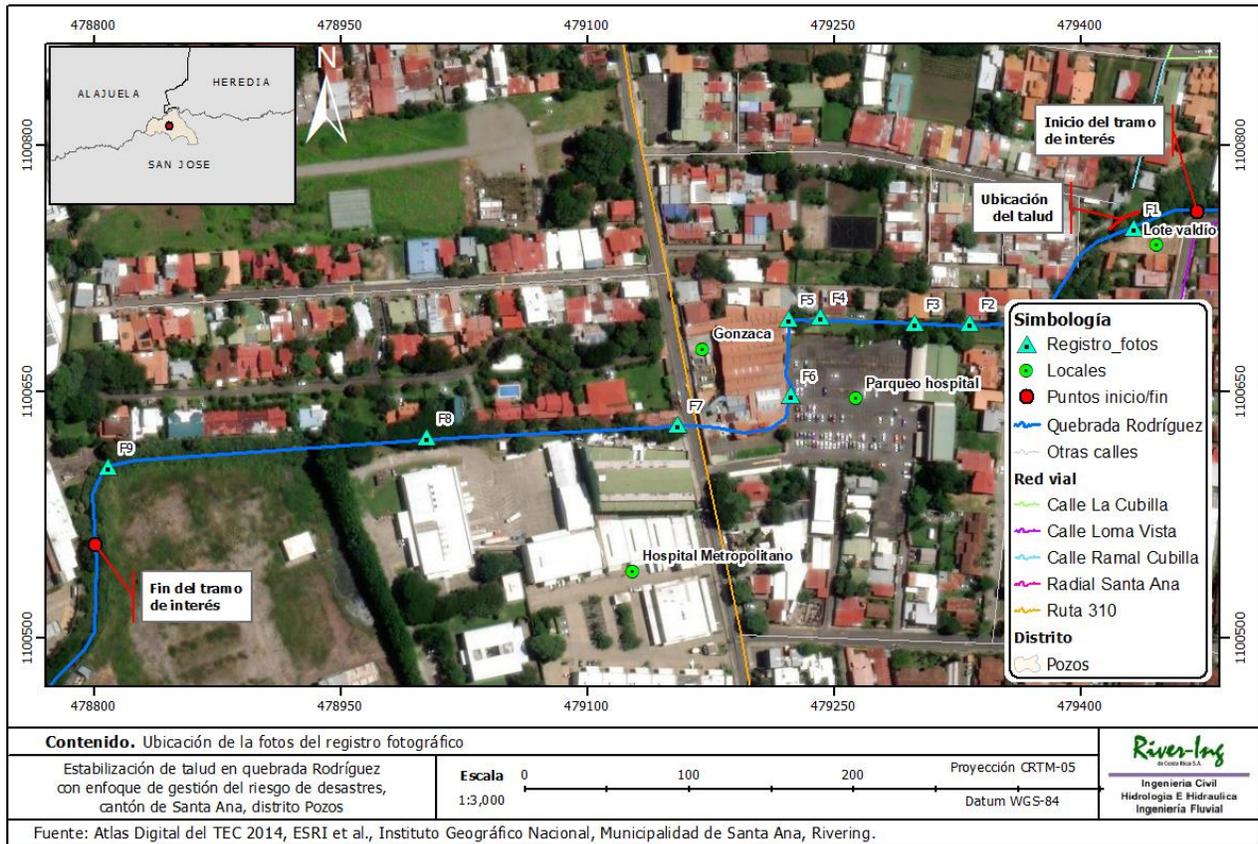
Los resultados se analizaron para ofrecer conclusiones y recomendaciones con respecto al riesgo de inundación, potencial de erosión del lecho y las márgenes.

Para dar respuesta a la problemática previamente identificada por los funcionarios municipales a la altura del desfogue pluvial de calle Ramal La Cubilla, se realizó una perforación SPT para determinar los parámetros geotécnicos para el diseño de una protección de talud y cabezal de alcantarilla de modo que se reduzca la erosión en la margen y el lecho en este punto de la quebrada Rodríguez.

Con motivos de efectuar los estudios indicados, se efectuó un levantamiento topográfico convencional de la quebrada.

## 1.6 Registro fotográfico de las condiciones actuales

En esta sección se describen las condiciones actuales del sitio con base en fotografías capturadas durante las visitas hechas entre el 22 de diciembre de 2022 y el 20 de febrero de 2023. En el Mapa 2 se muestra la ubicación espacial de las fotos mostradas para describir el tramo de interés.



Mapa 2. Ubicación de las fotografías del registro fotográfico

En la Fotografía 1 se muestra el punto de desfogue del pluvial de calle Ramal La Cubilla, punto donde se deberá construir un cabezal de concreto con el fin de reducir la socavación que genera la entrada de flujo pluvial hacia la quebrada. También se protegerá el talud de margen derecha en un área de 7.0 m de longitud y 4.0 m de altura, aguas arriba de este cabezal. Para ello se deberá limpiar la margen, donde se aprecia acumulación de desperdicios y pasto. Aguas abajo de la salida de la alcantarilla se encuentra construida una pantalla de concreto en una longitud de 25 m.



Fotografía 1. Desfogue pluvial existente, calle ramal La Cubilla

Después de este punto, la quebrada Rodríguez continúa a cielo abierto por 175 m, en general, se trata de un cauce estrecho de aproximadamente 2.0 - 2.5 m de ancho y 4.0 m de altura. En la margen izquierda, de acuerdo con los levantamientos efectuados por la empresa D'Geo en 2021 y la Fotografía 2, se tiene un muro de gavión. Por su parte, en la margen se recubrió el talud con una pantalla de concreto.

Posteriormente, la quebrada se confina en una longitud de 37 m al costado norte del parqueo del Hospital Metropolitano, la entrada del paso de puente se aprecia en la Fotografía 2 y su longitud en la Fotografía 3, es un tramo rectangular con paredes y cielo de concreto, el lecho se encuentra en terreno natural. Al final de este tramo la quebrada Rodríguez transcurre por debajo de la cochera de uno de los vecinos del sitio como se aprecia en la Fotografía 4, la Fotografía 5 muestra la salida de este tramo confinado. La quebrada continua a cielo abierto por 40 m entre paredes de concreto (al parecer confeccionadas con cilindros de concreto) y se confina nuevamente al costado oeste del parqueo del Hospital Metropolitano lo que se aprecia en la Fotografía 6.



Fotografía 2. Entrada quebrada bajo puente contiguo al parqueo del Hospital Metropolitano



Fotografía 3. Paso de quebrada bajo puente contiguo al parqueo del Hospital Metropolitano



Fotografía 4. Cochera bajo la que pasa la quebrada



Fotografía 5. Salida quebrada en túnel bajo cochera



Fotografía 6. Quebrada confinada bajo viviendas entre el Parque del Hospital Metropolitano y la salida a la Ruta N°310

El túnel continúa por aproximadamente 85 m, y sale bajo la Ruta N°310 con una sección rectangular que se muestra en Fotografía 7, en este punto se aprecian varios aportes de líneas

pluviales de la carretera. Además, la caída del agua ha erosionado el lecho del río. Los 400 m siguientes la quebrada fluye a cielo abierto, confinada lateralmente por las paredes de las casas o muros de gavión lo que se aprecia en las Fotografías de la 8 a la 9.

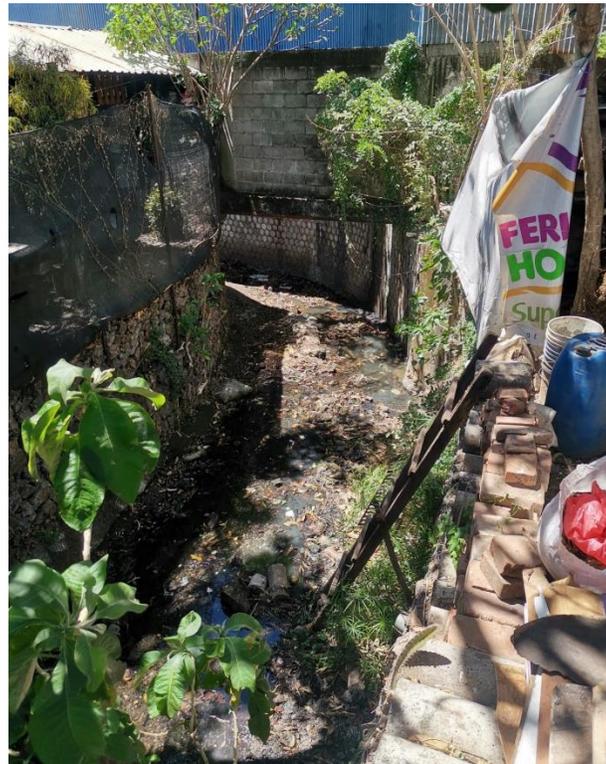


Fotografía 7. Paso del cauce de la quebrada Rodríguez bajo la Ruta Nacional N° 310

Como se aprecia a lo largo de las fotografías, se trata de un cauce con una cuenca altamente urbanizada y con restricción lateral a lo largo de toda su longitud, donde las viviendas y comercios han invadido la zona de protección, por lo cual no es raro que se presenten reportes de inundaciones en época lluviosa. Comentan los vecinos, por ejemplo, que el nivel de la quebrada durante las crecidas ha llegado al borde de los muros que se muestran en la Fotografía 5 y la Fotografía 9. También se puede apreciar en las fotografías que la quebrada tiene poca pendiente en el sector de interés.



Fotografía 8. Quebrada Rodríguez, cauce a cielo abierto después de la Ruta N° 310



Fotografía 9. Quebrada Rodríguez en la curva aguas abajo de la Ruta N° 310

En la Fotografía 10 se observa que dentro de la cuenca tributaria que llega al desfogue pluvial, se pueden encontrar algunas estructuras de paso que desvían una parte del caudal que transita por la alcantarilla hacia otros desfogues en quebradas cercanas, restando el caudal final que llega al desfogue bajo estudio. Además, debido a las condiciones de baja pendiente, existe acumulación de sedimentos, ramas y basura en diversos puntos de la línea pluvial que descarga en calle ramal La Cubilla (ver Fotografía 11).



Fotografía 10. Estructura de paso en una de las alcantarillas de la cuenca tributaria del desfogue pluvial



Fotografía 11. Acumulación de sedimentos en los tragantes pluviales de las líneas que desfogan en calle ramal La Cubilla

## 2. Caracterización de las cuencas

Para este análisis se empleó la cartografía a escala 1:25 000 del Instituto Geográfico Nacional, especialmente para la delimitación de las cuencas y el alineamiento de los cauces. Para otros elementos de ubicación, como los poblados, se empleó la información del Atlas Digital 2014 del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

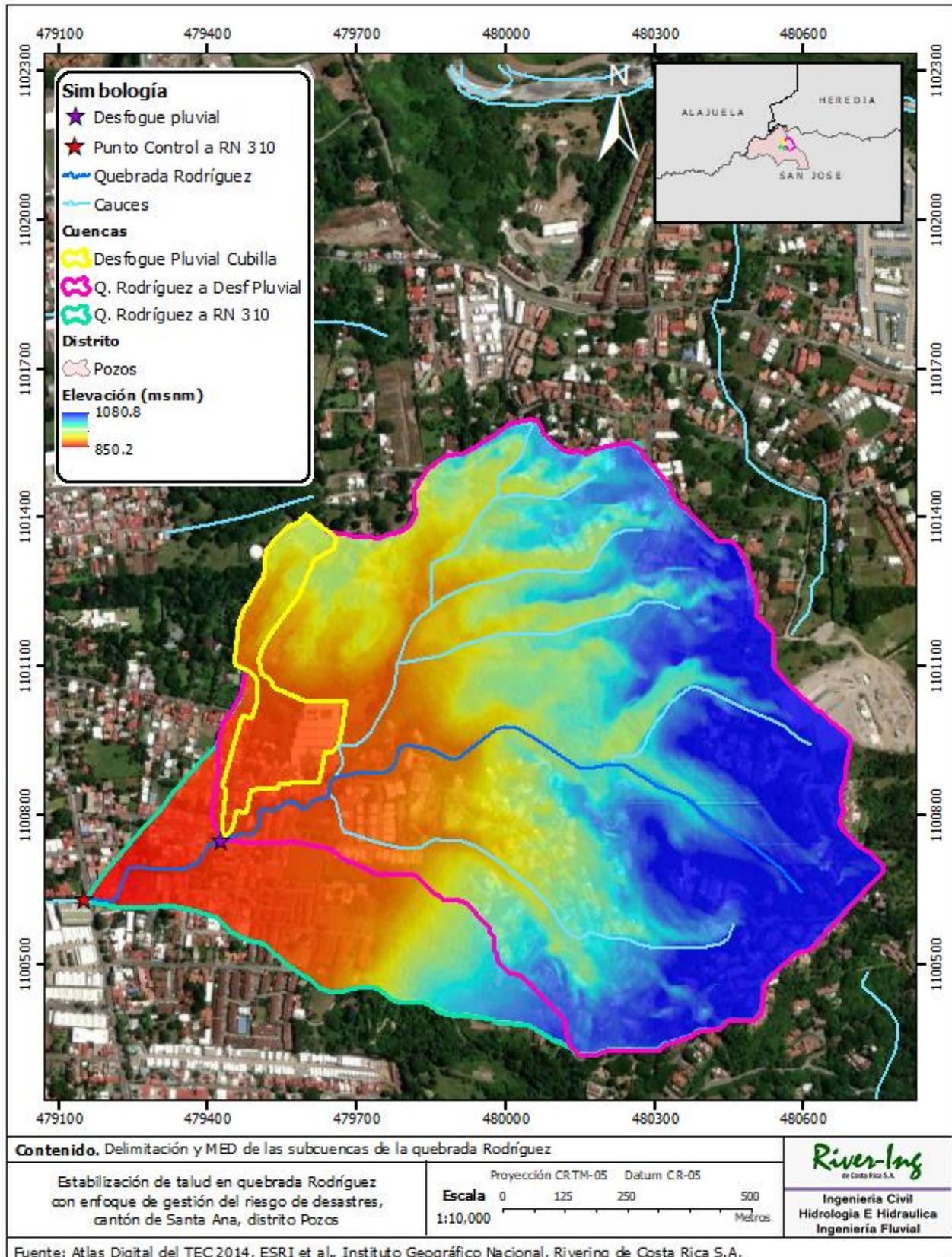
### 2.1 Características morfológicas

Para el estudio hidrológico del sitio de interés se propone el análisis de tres cuencas: la cuenca tributaria del desfogue pluvial en la Calle Ramal Cubilla (C014) mostrada, la subcuenca de la quebrada Rodríguez hasta el punto del desfogue pluvial y la cuenca de la quebrada Rodríguez hasta el punto de intersección con la Ruta Nacional 310. En el Mapa 3 se puede apreciar la delimitación de las cuencas hidrográficas y el modelo de elevación digital del terreno y la red hídrica que compone la cuenca de la quebrada Rodríguez. Para la cuenca tributaria, se muestra el tramo más largo que tributa al desfogue como cauce principal.

En su totalidad, la cuenca tributaria del desfogue pluvial tiene una superficie de 0.06 km<sup>2</sup>, la cuenca de la quebrada Rodríguez hasta el desfogue pluvial tiene una superficie de 1.07 km<sup>2</sup> y la cuenca de la quebrada Rodríguez hasta la Ruta Nacional tiene una superficie de 1.26 km<sup>2</sup>. Todas se extienden por el distrito de Pozos del cantón de Santa Ana, en la provincia de San José.

Tabla 2. Características de las cuencas bajo estudio

| Característica                                 | Tributaria hasta el desfogue pluvial | Q. Rodríguez hasta el desfogue pluvial | Q. Rodríguez hasta la Ruta Nacional |
|--|--------------------------------------|--|-------------------------------------|
| <b>Área (km<sup>2</sup>)</b>                   | 0.06                                 | 1.07                                   | 1.26                                |
| <b>Perímetro (km)</b>                          | 1.82                                 | 4.38                                   | 4.78                                |
| <b>Elevación máxima (msnm)</b>                 | 922.2                                | 1080.8                                 | 1080.8                              |
| <b>Elevación mínima (msnm)</b>                 | 856.7                                | 856.7                                  | 850.2                               |
| <b>Longitud de cauce principal (km)</b>        | 0.72                                 | 1.42                                   | 1.76                                |
| <b>Índice compacidad (I<sub>G</sub>)</b>       | 2.02                                 | 1.19                                   | 1.20                                |
| <b>Factor de forma (K<sub>f</sub>)</b>         | 0.13                                 | 0.53                                   | 0.41                                |
| <b>Pendiente media del cauce principal (%)</b> | 8.1                                  | 12.2                                   | 10.3                                |
| <b>Pendiente promedio de la cuenca (%)</b>     | 9.6                                  | 22.2                                   | 20.6                                |
| <b>Precipitación media de la cuenca (mm)</b>   | 2000                                 | 2000                                   | 2000                                |



Mapa 3. Delimitación y MED de la cuenca de la quebrada Rodríguez y la subcuenca del desfogue pluvial

En cuanto al índice de compacidad, la cuenca tributaria del desfogue pluvial se clasifica como rectangular, mientras que ambas subcuencas de la quebrada Rodríguez se clasifican como ovals redondas. En cuanto al factor de forma, la cuenta tributaria se clasifica como estrecha, la subcuenca de la quebrada Rodríguez hasta el desfogue se clasifica como amplia y hasta la RN 310 se categoriza como alargada. (Sellers, Buján, Corbelle, & Miranda, 2017).

En el Gráfico 1 se presenta el perfil del cauce principal de la cuenca de la quebrada Rodríguez hasta su intersección con la RN 310, se demarca además la ubicación del desfogue pluvial. El cauce principal hasta el desfogue pluvial de calle Ramal La Cubilla tiene una longitud de 1.42 km, mientras has la RN 310 posee una longitud de 1.76 km y con una pendiente media de 10.3%<sub>m</sub>, aproximadamente.

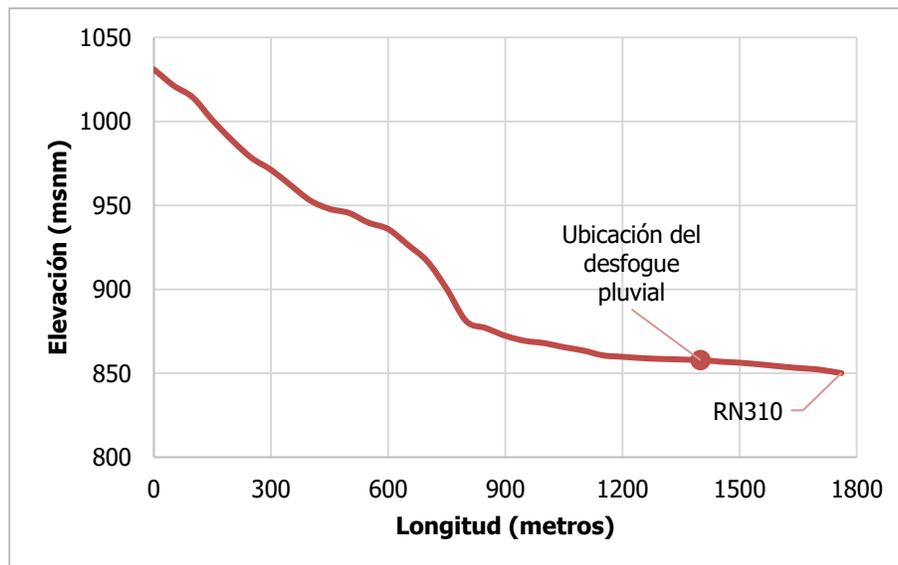


Gráfico 1. Perfil del cauce principal para la cuenca de la quebrada Rodríguez hasta el desfogue pluvial

En el Gráfico 2 se presenta la curva hipsométrica para la cuenca de la quebrada Rodríguez hasta la RN310, la elevación varía desde un máximo de 1081 msnm hasta 850 msnm. Dada la forma de la curva, se puede clasificar la cuenca en una fase de equilibrio, por lo que se espera una tasa de sedimentación igual que la tasa de transporte (Strahler, 1952).

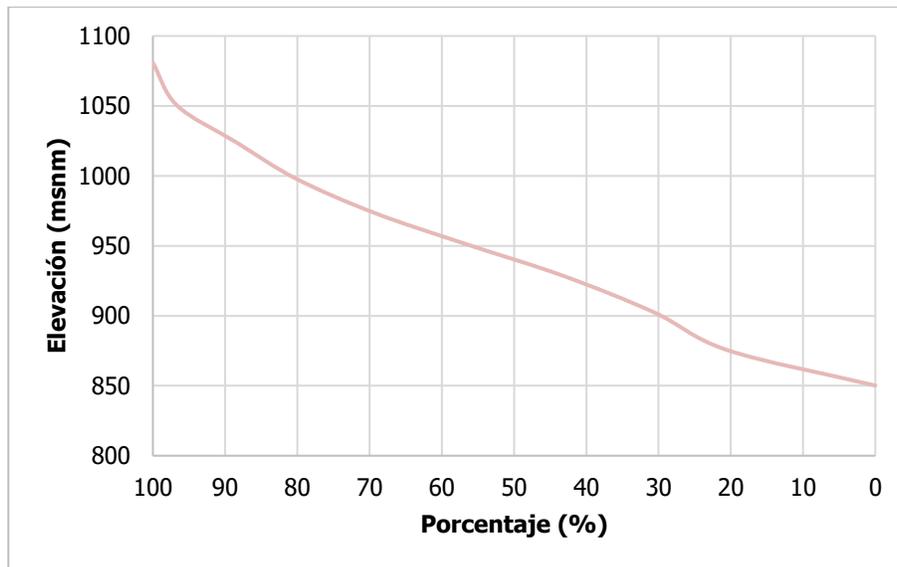


Gráfico 2. Curva hipsométrica para la cuenca de la quebrada Rodríguez hasta la Ruta Nacional 310

En el Gráfico 3 se presenta el perfil del tramo más largo de la cuenca tributaria del desfogue pluvial, el cual cuenta con una longitud de 0.72 km y una pendiente media de 8.14%. En el Gráfico 4 se presenta la curva hipsométrica de la cuenca tributaria del desfogue pluvial, en la que se muestra que la elevación varía desde un máximo de 922 msnm hasta 857 msnm.

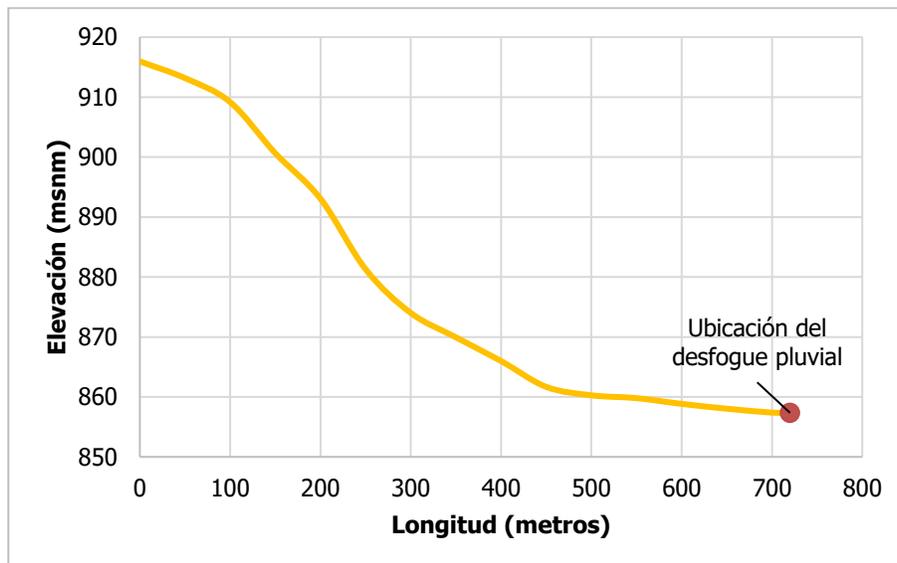


Gráfico 3. Perfil del tramo más largo para la cuenca tributaria del desfogue pluvial

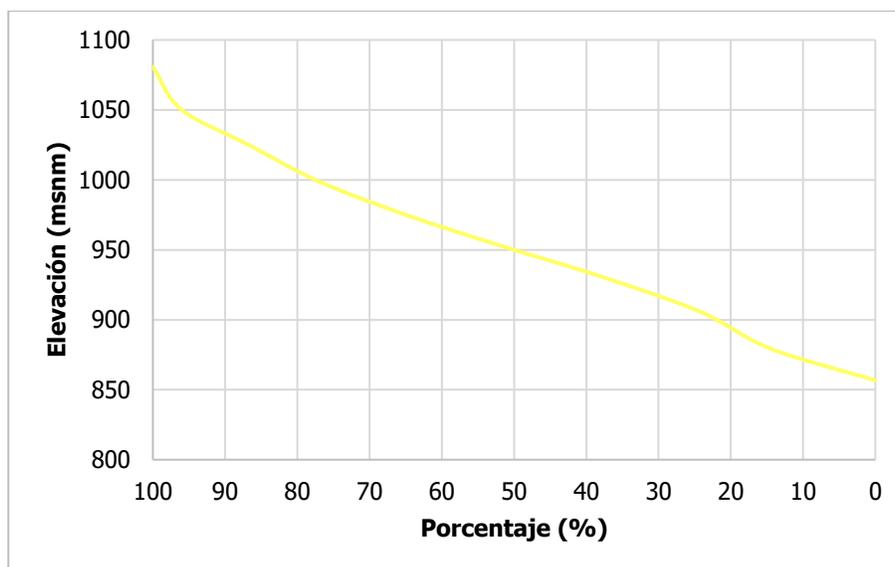


Gráfico 4. Curva hipsométrica para la cuenta tributaria del desfogue pluvial

## 2.2 Características de pérdidas de precipitación

### 2.2.1 Usos de suelo y número de curva

Para caracterizar las pérdidas de precipitación durante una tormenta dada, se empleó la metodología del número de curva de escorrentía (CN), desarrollado por el Natural Resources Conservation Service (Natural Resources Conservation Service, 2010). Este método permite calcular las pérdidas asociadas a interceptación, detención superficial e infiltración mediante un parámetro de abstracción asociado al número de curva.

En la Tabla 3 se resumen las características de cobertura del suelo y número de curva para las subcuencas en estudio, esto para el escenario de uso de suelo actual mostrado en el Mapa 4. Como se aprecia en el Mapa 4 y la Tabla 3, para las subcuencas de la quebrada Rodríguez la mayor proporción del área consiste en bosque regular, mientras en el caso de la cuenca tributaria del desfogue pluvial corresponde al área residencial. Cabe mencionar que esta clasificación de cobertura de suelo se hizo manualmente mediante Sistemas de Información Geográfica y fotografías aéreas disponibles en Google Earth.

En la Tabla 3 la condición hidrológica se relaciona con la cantidad y la calidad de la cobertura vegetal. En el caso de los pastizales, una condición hidrológica regular implica un área cubierta por pasto natural de entre el 50% y 75%. En lo que respecta al grupo hidrológico, corresponde a las propiedades asociadas al suelo desnudo, el efecto de la cobertura vegetal no es considerado en este parámetro, ya que dicho efecto se contempla mediante la condición hidrológica.

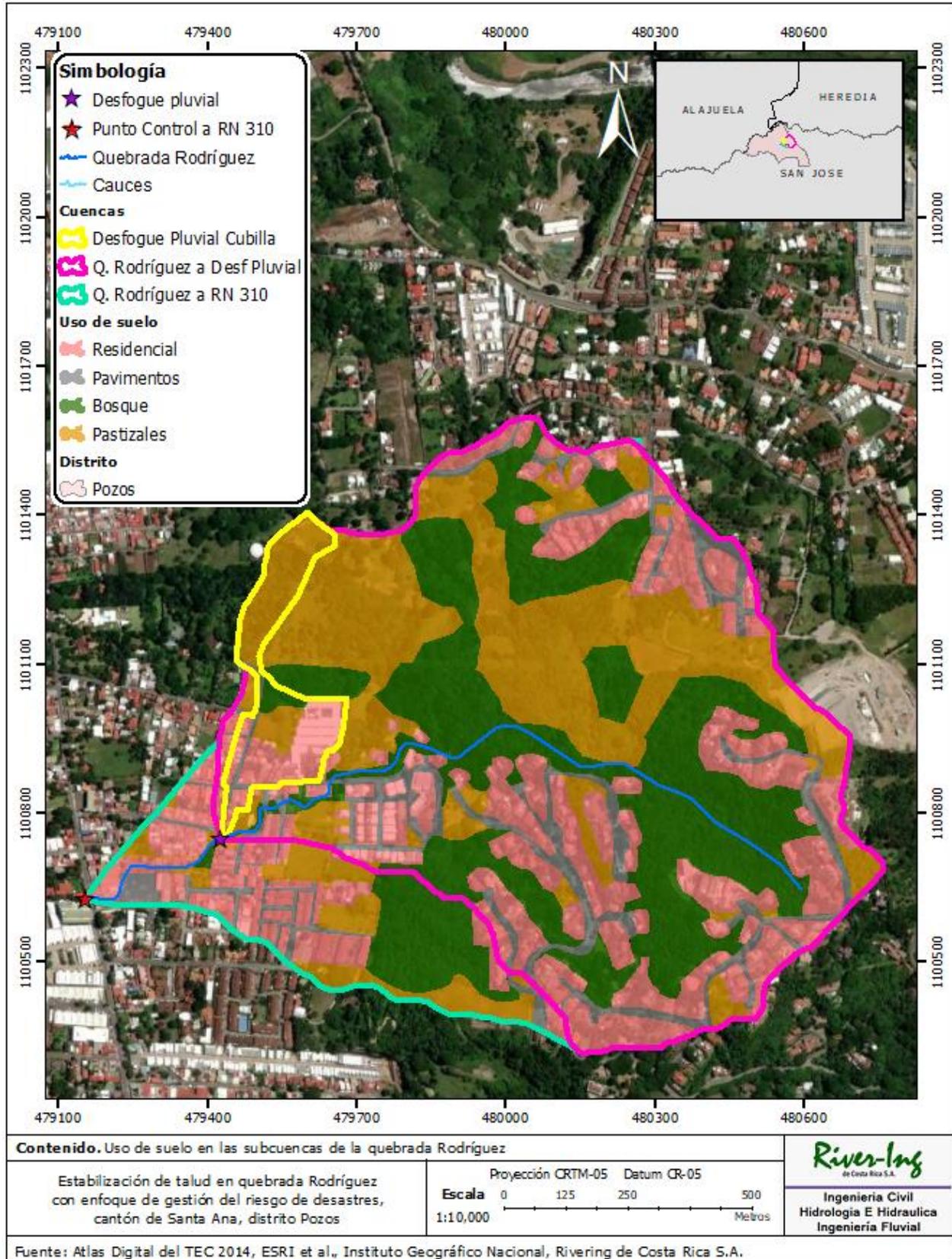
El Natural Resources Conservation Service (2009) clasifica los suelos en cuatro grupos hidrológicos vinculados, principalmente, a su potencial de escurrimiento. Para las cuencas en estudio se identificaron los grupos hidrológicos tipo B y C, para las unidades cartográficas de Las Palomas y La Guácima (ver la Tabla 4). Las categorizaciones anteriores se realizaron de acuerdo con la clasificación de capacidad de uso del suelo en Costa Rica y el Manual descriptivo de la leyenda del mapa de capacidad de uso de la tierra de Costa Rica Escala 1:200.000 del Ministerio de Agricultura y Ganadería (Ministerio de Agricultura y Ganadería, 1991).

Tabla 3. Características del uso del suelo para la cuenca

| Uso de suelo en la cuenca tributaria del desfogue pluvial |                        |                   |            |           |            |           |            |           |
|---|------------------------|-------------------|------------|-----------|------------|-----------|------------|-----------|
| Uso del suelo   | Condición hidrológica  | Grupo hidrológico | 2023       |           | 2048       |           | 2073       |           |
|   |                        |                   | Porcentaje | No. Curva | Porcentaje | No. Curva | Porcentaje | No. Curva |
| <b>Área residencial</b>                                   | 65% impermeabilización | B/C               | 34.7%      | 88.5      | 41.3%      | 88.5      | 49.2%      | 88.5      |
| <b>Pavimentos</b>   | -                      | B/C               | 8.1%       | 98.2      | 8.1%       | 98.2      | 8.1%       | 98.2      |
| <b>Bosque</b>   | Regular                | B/C               | 34.5%      | 68.9      | 32.3%      | 68.9      | 27.9%      | 68.9      |
| <b>Pastizal</b>   | Regular                | B/C               | 22.7%      | 76.9      | 18.4%      | 76.9      | 14.9%      | 76.9      |
| <b>Número de curva ponderado</b>                          |                        |                   |            | 79.9      |            | 80.9      |            | 82.1      |
| <b>Pérdidas iniciales (mm)</b>                            |                        |                   |            | 12.8      |            | 12.0      |            | 11.1      |

| Uso de suelo en la quebrada Rodríguez hasta el desfogue pluvial |                        |                   |            |           |            |           |            |           |
|---|------------------------|-------------------|------------|-----------|------------|-----------|------------|-----------|
| Uso del suelo   | Condición hidrológica  | Grupo hidrológico | 2023       |           | 2048       |           | 2073       |           |
|   |                        |                   | Porcentaje | No. Curva | Porcentaje | No. Curva | Porcentaje | No. Curva |
| <b>Área residencial</b>   | 65% impermeabilización | B/C               | 27.4%      | 89.5      | 30.2%      | 89.5      | 33.3%      | 89.5      |
| <b>Pavimentos</b>   | -                      | B/C               | 9.1%       | 98.3      | 9.1%       | 98.3      | 9.2%       | 98.3      |
| <b>Bosque</b>   | Regular                | B/C               | 32.0%      | 71.2      | 30.8%      | 71.2      | 29.3%      | 71.2      |
| <b>Pastizal</b>   | Regular                | B/C               | 31.5%      | 78.7      | 29.8%      | 78.7      | 28.2%      | 78.7      |
| <b>Número de curva ponderado</b>                                |                        |                   |            | 81.1      |            | 81.5      |            | 81.9      |
| <b>Pérdidas iniciales (mm)</b>                                  |                        |                   |            | 11.9      |            | 11.6      |            | 11.2      |

| Uso de suelo en la quebrada Rodríguez hasta la Ruta Nacional N° 310 |                        |                   |            |           |            |           |            |           |
|---|------------------------|-------------------|------------|-----------|------------|-----------|------------|-----------|
| Uso del suelo   | Condición hidrológica  | Grupo hidrológico | 2023       |           | 2048       |           | 2073       |           |
|   |                        |                   | Porcentaje | No. Curva | Porcentaje | No. Curva | Porcentaje | No. Curva |
| <b>Área residencial</b>   | 65% impermeabilización | B/C               | 29.7%      | 89.5      | 32.5%      | 89.5      | 35.9%      | 89.5      |
| <b>Pavimentos</b>   | -                      | B/C               | 9.4%       | 98.3      | 9.5%       | 98.3      | 9.6%       | 98.3      |
| <b>Bosque</b>   | Regular                | B/C               | 30.9%      | 71.1      | 29.8%      | 71.1      | 28.2%      | 71.1      |
| <b>Pastizal</b>   | Regular                | B/C               | 30.4%      | 78.6      | 28.3%      | 78.6      | 26.3%      | 78.6      |
| <b>Número de curva ponderado</b>                                    |                        |                   |            | 81.3      |            | 81.8      |            | 82.3      |
| <b>Pérdidas iniciales (mm)</b>                                      |                        |                   |            | 11.7      |            | 11.3      |            | 10.9      |



Mapa 4. Uso de suelos en las subcuencas de la quebrada Rodríguez

Tabla 4. Características de las unidades cartográficas en las cuencas bajo estudio

| Unidad             | Grupo | Relieve              | Profundidad            | Textura | Drenaje    | Permeabilidad |
|--------------------|-------|----------------------|------------------------|---------|------------|---------------|
| <b>Las Palomas</b> | B     | Fuertemente ondulado | Moderadamente profundo | Media   | Bueno      | Permeable     |
| <b>La Guácima</b>  | C     | Ligeramente ondulado | Moderadamente profundo | Fina    | Imperfecto | Lenta         |

Para tomar en cuenta las consecuencias del crecimiento urbano, aspecto que debe ser considerado en la propuesta de diseño. La Tabla 3 presenta los escenarios de cambio de uso de suelo proyectado a 25 y 50 años con su efecto correspondiente en el número de curva.

Para estimar el cambio en el uso de suelo, se realizó la clasificación de la cobertura del suelo basada en imágenes áreas satelitales de la zona de estudio asociadas a los años 2003, 2011 y 2023. Con base en las áreas estimadas de pastos, bosques, pavimentos y residencias/industria para cada año, se calculó el porcentaje de cambio entre cada periodo, valores que fueron proyectados a futuro asumiendo un comportamiento lineal. Conforme a lo esperado, la tendencia indica que las zonas residenciales y de pavimentos irán ganándole área a las regiones de pastos y bosque, lo que conlleva un incremento en el número de curva y en los caudales escurridos.

### 2.2.2 Abstracciones hidrológicas iniciales

Del análisis desarrollado en el apartado anterior, se desprende que el número de curva ponderado asociado a la cuenca tributaria al desfogue pluvial es de 75.9 para la condición actual y 78.6 para el escenario de 50 años a futuro. En el caso de la cuenca de la quebrada Rodríguez hasta el desfogue pluvial el número de curva es de 77.2 y para la quebrada Rodríguez hasta la Ruta Nacional N° 310 es de 77.5 para el escenario actual y de 78.2 y 78.7, respectivamente, para el escenario de crecimiento a 50 años plazo.

En todos los casos el número de curva se estimó para una condición de humedad antecedente tipo II (AMC II) con corrección por pendiente. Las pérdidas o abstracciones iniciales de las subcuencas se obtuvieron mediante la siguiente ecuación (1), obtenida por el NRCS como una relación empírica al estudiar los resultados obtenidos para muchas cuencas experimentales:

$$P_{iniciales} = \frac{5080}{CN} - 50.8 \quad (1)$$

### 2.3 Tiempo de concentración de la cuenca

Para determinar el tiempo de concentración de una cuenca, es necesario considerar las condiciones de la cobertura vegetal, así como la topografía y morfología del sitio. Estas características son determinantes para el tiempo de viaje de la escorrentía en los distintos modos de transporte. De esta manera, el tiempo de concentración depende de tres componentes que, en conjunto, representan de forma más realista el comportamiento de la escorrentía. Estos son: el flujo laminar no concentrado (FLNC), el flujo laminar concentrado (FLC) y el flujo concentrado (FC) (Oregon Department of Transportation Highway Division, 2005).

El FLNC ocurre aproximadamente en los primeros 100 m desde la divisoria de aguas. El FLC se desarrolla en los siguientes 500 m, aproximadamente, hasta la llegada a un subcolector o al cauce principal. Por su parte, el FC ocurre a lo largo de los subcolectores y el cauce principal hasta el punto de interés (Oregon Department of Transportation Highway Division, 2005).

Para el cálculo del tiempo de viaje (min) en flujo laminar no concentrado se aplica la siguiente ecuación (Oregon Department of Transportation Highway Division, 2005)

$$T_{osf} = \frac{0.93(L^{0.6}n^{0.6})}{(i^{0.4}S^{0.3})} \quad (2)$$

En la ecuación anterior,  $L$  es la longitud de recorrido en FLNC (ft),  $n$  es el coeficiente de rugosidad de Manning,  $i$  corresponde a una intensidad de un escenario de precipitación analizado (in/h) y  $S$  es la pendiente del tramo (m/m).

Por otra parte, el FLC se desarrolla en la subsiguiente distancia, hasta la llegada a un subcolector o al cauce principal. En este caso, se emplea la siguiente ecuación para determinar el tiempo de viaje (min):

$$T_{scf} = \frac{L}{60v} \quad (3)$$

En la ecuación anterior,  $T_{scf}$  es el tiempo de concentración,  $L$  es la longitud de viaje (ft) y  $v$  es la velocidad del agua (ft/s). En el caso de la velocidad, esa se puede calcular con el nomograma de cálculo de velocidades en flujo laminar concentrado, según la Figura 1.

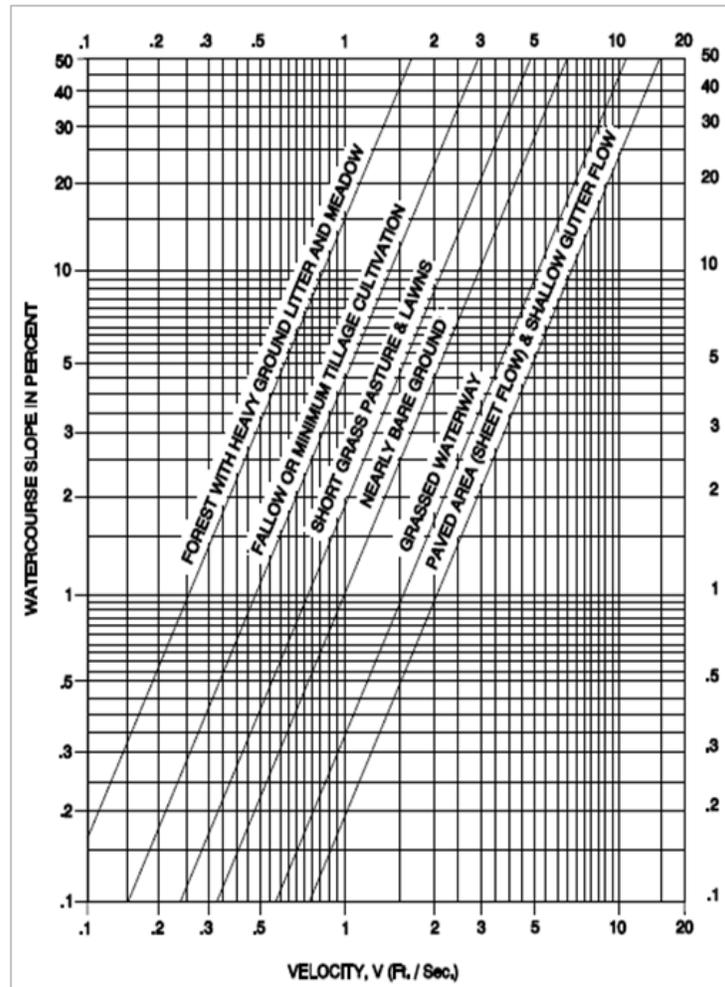


Figura 1. Determinación de velocidad de agua en flujo laminar concentrado

Finalmente, el FC ocurre a lo largo de los subcolectores y del cauce principal, hasta el punto de control (Oregon Department of Transportation Highway Division, 2005). Para determinar el tiempo del modo de viaje en flujo concentrado ( $T_{fc}$ ), se empleó el método de Manning. Para el cálculo de la velocidad de Manning, se requiere dividir la longitud del cauce principal en tramos, a esos tramos se les asigna información de pendiente ( $S$ ), rugosidad de Manning ( $n$ ) y geometría de la sección transversal ( $R$ ), para posteriormente, aplicar la ecuación (4).

$$v_m = \frac{1}{n} R^{2/3} S^{1/2} \quad (4)$$

Una vez que se conoce la velocidad y la distancia de cada tramo, es posible determinar el tiempo de viaje en cada uno. El tiempo total para el modo de viaje de flujo concentrado es entonces, la suma de los tiempos de todos los tramos en los que se dividió el cauce.

Finalmente, el tiempo de concentración corresponde a la suma del  $T_{osf}$ ,  $T_{scf}$  y  $T_{fc}$ , siendo un proceso iterativo por cuanto  $T_{osf}$  es dependiente de la intensidad de la lluvia. En el Tabla 5 se muestra el resumen de la estimación de los tiempos de concentración para la cuenca hidrográfica. Cabe indicar que, en la Tabla 5,  $T_{lag}$  corresponde al retardo al pico del hidrograma al comienzo de la tormenta de diseño, según la metodología del hidrograma unitario SCS, es decir, 60% del tiempo de concentración total.

Tabla 5. Estimación de tiempos de concentración

| Tiempo                                 | Cuenca tributaria al desfogue pluvial | Cuenca Q. Rodríguez al desfogue pluvial | Cuenca Q. Rodríguez a la RN 310 |
|--|---------------------------------------|---|---------------------------------|
| <b><math>T_{osf}</math> FLNC (min)</b> | 4.99                                  | 5.49                                    | 5.49                            |
| <b><math>T_{sfc}</math> FLC (min)</b>  | 2.73                                  | 3.61                                    | 3.61                            |
| <b><math>T_{fc}</math> FC (min)</b>    | 5.57                                  | 8.89                                    | 12.68                           |
| <b><math>T_c</math> (min)</b>          | 13.30                                 | 17.98                                   | 21.77                           |
| <b><math>T_c</math> (horas)</b>        | 0.22                                  | 0.30                                    | 0.36                            |
| <b><math>T_{lag}</math> (min)</b>      | 7.98                                  | 10.79                                   | 13.06                           |

Para el flujo laminar no concentrado se empleó la intensidad registrada en la estación 84021 Aeropuerto Juan Santamaría de 177 mm/h. Esta es correspondiente a una intensidad promedio de precipitación para una duración de 15 minutos con un periodo de retorno de 10 años (Vahrson & Dercksen, 1990).

### 3. Análisis de datos de precipitación

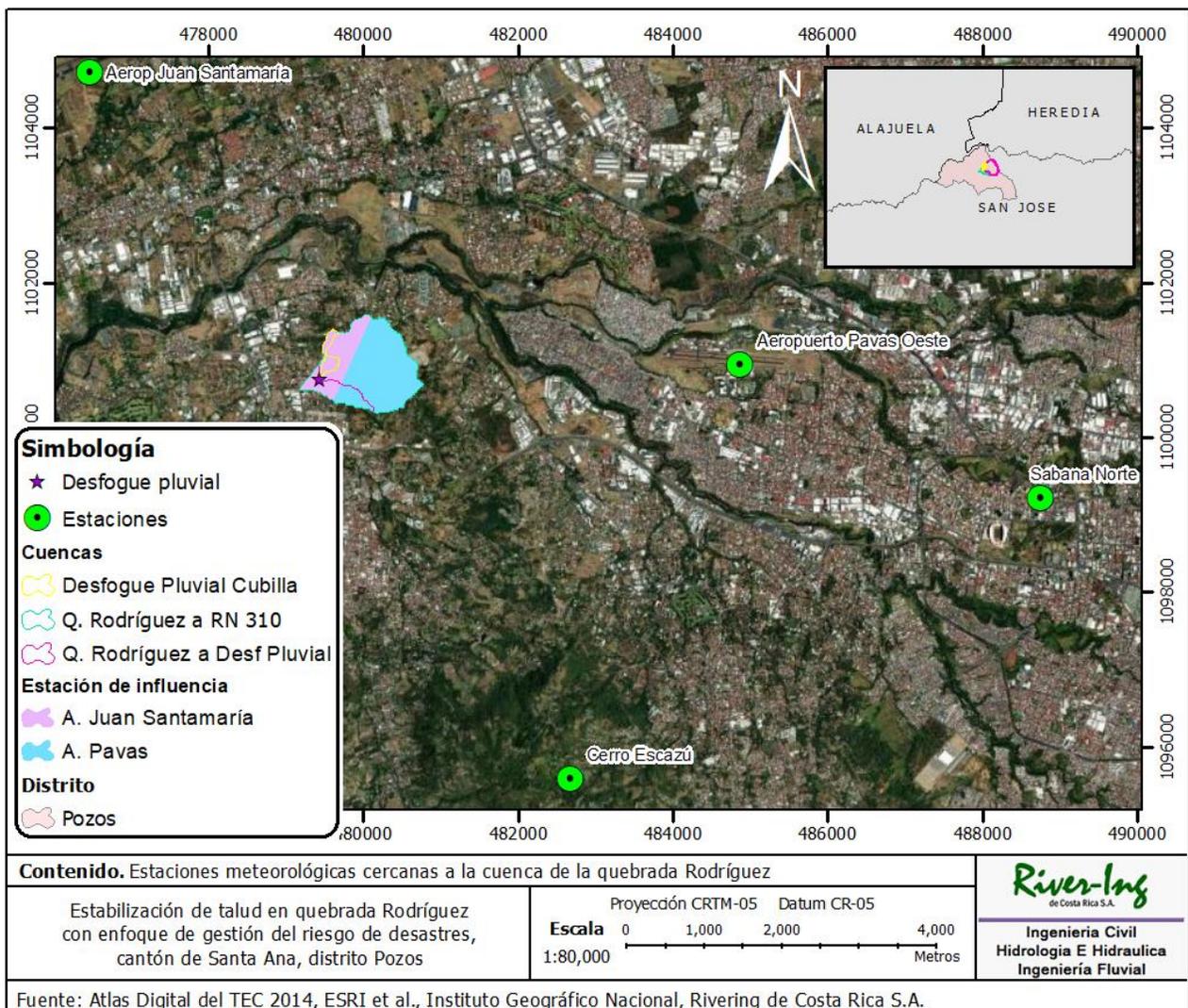
#### 3.1 Información disponible para el análisis

Para el estudio hidrológico de las subcuencas de la quebrada Rodríguez se contó con información de las estaciones meteorológicas que se detallan en la Tabla 6 por número de estación, nombre, ubicación, elevación y periodo de registro. La localización geográfica de estas estaciones respecto a la cuenca se muestra en el Mapa 5.

Adicional a esta información, se dispuso de las curvas IDF propuestas por Villón (2004) para la provincia de San José.

Tabla 6. Resumen de la información meteorológica disponible

| N°    | Estación<br>Nombre         | Institución | Coordenadas (CRTM 05) |           | Altitud (msnm) | Tipo de datos   | Periodo de registro (año) |       |
|-------|----------------------------|-------------|-----------------------|-----------|----------------|---|---------------------------|-------|
|       |                            |             | Norte                 | Este      |                |   | Inicio                    | Final |
| 84169 | Aeropuerto Juan Santamaría | IMN         | 1 104 721.2           | 476 461.8 | 913            | Serie anual de intensidades máximas de 5, 10, 15 y 30 minutos | 1980                      | 2020  |
| 84193 | Aeropuerto Pavas Oeste     | IMN         | 1 100 946.6           | 484 869.3 | 997            |   | 1980                      | 2020  |
| 84096 | Sabana Norte               | ICE         | 1 099 223.0           | 488 754.0 | 1 129          |   | 1998                      | 2018  |
| 84120 | Cerro Escazú               | ICE         | 1 095 587.0           | 482 681.0 | 1 500          |   | 1997                      | 2011  |



Mapa 5. Ubicación y área de influencia de las estaciones meteorológicas consideradas

### 3.2 Distribución temporal de la precipitación

Con el objetivo de contrastar las condiciones de precipitación características de las estaciones meteorológicas cercanas a este proyecto, en el Gráfico 5 se muestran las series de precipitación máxima anual acumulada de 15 minutos. Como se aprecia, el comportamiento temporal de la lluvia es relativamente constante a lo largo del periodo de registro para las cuatro estaciones, con un promedio de precipitación que ronda los 25 milímetros acumulados en 15 minutos.

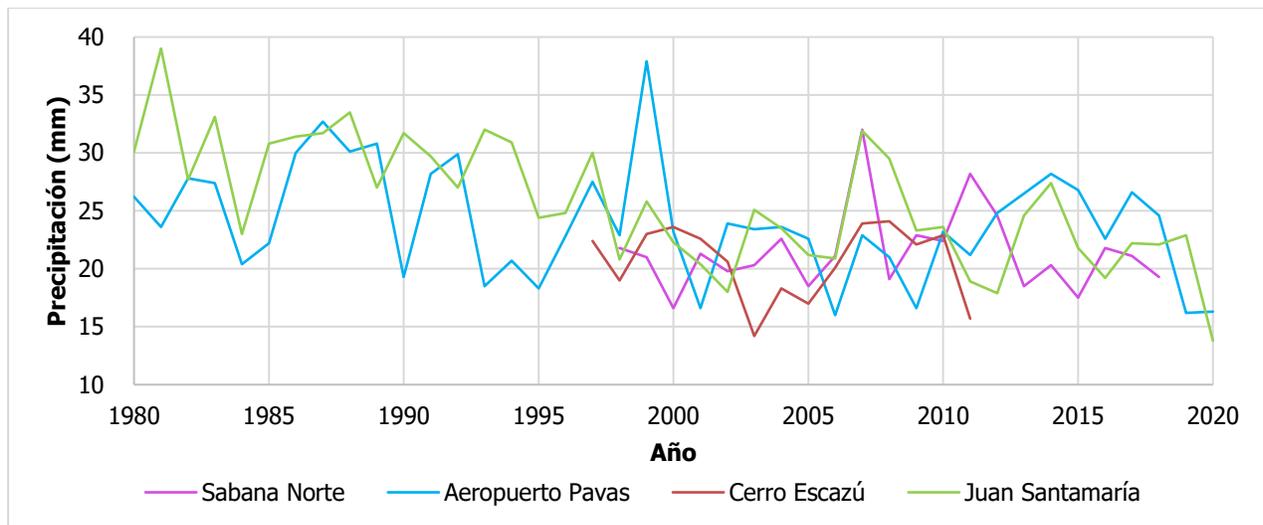


Gráfico 5. Acumulados de precipitación en 15 minutos para las estaciones de interés

Para establecer cual estación representa mejor las magnitudes de precipitación en la cuenca de la quebrada Rodríguez se utilizó la metodología de polígonos de Thiessen. Los resultados de los polígonos de Thiessen aprecian en el Mapa 5, a partir ellos se descartó el uso del registro de intensidades máximas anuales de las estaciones 84120 Cerro Escazú y 84096 Sabana Norte.

### 3.3 Análisis de frecuencias de la información meteorológica

El análisis de frecuencias se realizó con el fin de determinar los parámetros de la distribución de probabilidad de valores extremos que permiten el mejor ajuste a los datos de las estaciones 84169 Aeropuerto Juan Santamaría y 84193 Aeropuerto Pavas Oeste. Se estimaron los acumulados de precipitación en 5, 10, 15 y 30 minutos para periodos de retorno de 2, 25, 50, 100 y 200 años, empleando la distribución teórica de probabilidad GEV (Valor extremo generalizada).

Tabla 7. Valores de precipitación acumulada asociados a distintos periodos de para la estación 84169 Aeropuerto Juan Santamaría y 84193 Aeropuerto Pavas Oeste

| 84169 Aeropuerto Juan Santamaría |                    |        |        |        | 84193 Aeropuerto Pavas Oeste |                    |        |        |        |
|----------------------------------|--------------------|--------|--------|--------|------------------------------|--------------------|--------|--------|--------|
| TR                               | Precipitación (mm) |        |        |        | TR                           | Precipitación (mm) |        |        |        |
|                                  | 5 min              | 10 min | 15 min | 30 min |                              | 5 min              | 10 min | 15 min | 30 min |
| <b>2</b>                         | 10.89              | 18.83  | 25.54  | 39.31  | <b>2</b>                     | 10.29              | 17.61  | 23.60  | 34.00  |
| <b>25</b>                        | 19.73              | 27.02  | 35.56  | 50.23  | <b>25</b>                    | 11.05              | 20.17  | 33.29  | 48.15  |
| <b>50</b>                        | 22.53              | 28.23  | 37.19  | 51.44  | <b>50</b>                    | 11.07              | 20.27  | 35.04  | 50.57  |
| <b>100</b>                       | 25.62              | 29.23  | 38.57  | 52.33  | <b>100</b>                   | 11.07              | 20.33  | 36.59  | 52.64  |
| <b>200</b>                       | 29.01              | 30.05  | 39.74  | 52.99  | <b>200</b>                   | 11.07              | 20.36  | 37.95  | 54.43  |

De la tabla anterior se destaca que la precipitación estimada con los datos de la estación 84169 Aeropuerto Juan Santamaría es mayor que para la 84193 Aeropuerto Pavas. Como se trata de una cuenca pequeña, a modo conservador, se continuará el análisis haciendo uso de los datos proyectados para la estación 84169 Aeropuerto Juan Santamaría únicamente.

### 3.4 Curva Duración-Precipitación-Frecuencia

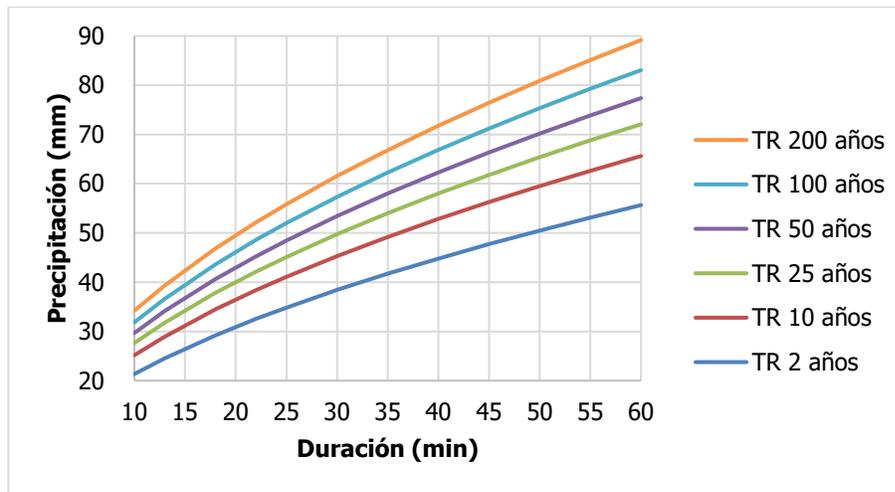
Para obtener de forma analítica las curvas PDF de la estación 84169 Aeropuerto Juan Santamaría, se utilizó la ecuación (5) propuesta por Aparicio (1997):

$$P = \frac{k \cdot TR^a}{D^b} \quad (5)$$

Donde TR corresponde al periodo de retorno en años, D es la duración del evento en minutos y P es la precipitación en milímetros. Además, a, b, k son constantes desconocidas, cuyos valores se pueden obtener a partir de una regresión lineal múltiple, definida por la ecuación (6), la cual se obtiene al aplicar logaritmo natural a la ecuación (5).

$$\ln(i) = \ln(k) + a \cdot \ln(TR) - b \cdot \ln(D) \quad (6)$$

Al efectuar la regresión múltiple utilizando los datos de la Tabla 7, se obtuvo la ecuación representativa de las curvas PDF. Tras aplicar la ecuación y graficarla para diferentes periodos de retorno, se definieron las curvas mostradas en el Gráfico 6.



$$P = \frac{5.806 \cdot TR^{0.1023}}{D^{-0.5347}}$$

Gráfico 6. Curva PDF para la estación 84169 Aeropuerto Juan Santamaría

En la Tabla 8 se resumen los valores de intensidad asociada al tiempo de concentración de la cuenca para cada periodo de retorno que se obtuvieron a partir de la curva PDF generada para la estación 84169 Aeropuerto Juan Santamaría y las curvas IDF de Villón (2004). Se recuerda que el periodo de retorno de diseño es de 50 años.

Tabla 8. Intensidades de precipitación en las cuencas según curvas IDF y estación 84169 del IMN

| Cuenca                                 | Duración (min) | Periodo de retorno | Intensidad de precipitación (mm/h) |                           |
|--|----------------|--------------------|------------------------------------|---------------------------|
|  |                |                    | Estación 84169 AJSM                | Curvas IDF (Villón, 2004) |
| Tributaria del desfogue pluvial        | 13             | 2                  | 113.4                              | 99.3                      |
|  |                | <b>50</b>          | <b>157.6</b>                       | <b>141.6</b>              |
|  |                | 100                | 169.2                              | 150.7                     |
|  |                | 200                | 181.6                              | 159.8                     |
| Q. Rodríguez hasta el desfogue pluvial | 18             | 2                  | 97.4                               | 89.0                      |
|  |                | <b>50</b>          | <b>135.5</b>                       | <b>128.4</b>              |
|  |                | 100                | 145.4                              | 136.9                     |
|  |                | 200                | 156.1                              | 145.4                     |
| Q. Rodríguez hasta la RN 310           | 22             | 2                  | 88.8                               | 82.7                      |
|  |                | <b>50</b>          | <b>123.4</b>                       | <b>120.3</b>              |
|  |                | 100                | 132.5                              | 128.4                     |
|  |                | 200                | 142.2                              | 136.4                     |

### 3.5 Hietogramas de diseño: bloque alterno

Un hietograma representa la distribución temporal de la intensidad (mm/hr) o profundidad (mm) de precipitación a lo largo de un evento. El hietograma de diseño puede ser obtenido de diversas maneras en función del tipo de datos disponibles en el análisis.

Para modelar la distribución de la lluvia se utilizó una tormenta sintética según la metodología del bloque alterno. Se decidió utilizar los datos de la estación 84169 Aeropuerto Juan Santamaría en lugar de los datos generados con las curvas IDF de la provincia de San José estimados por Villón (2004), pues genera intensidades mayores y, por lo tanto, es un escenario más conservador.

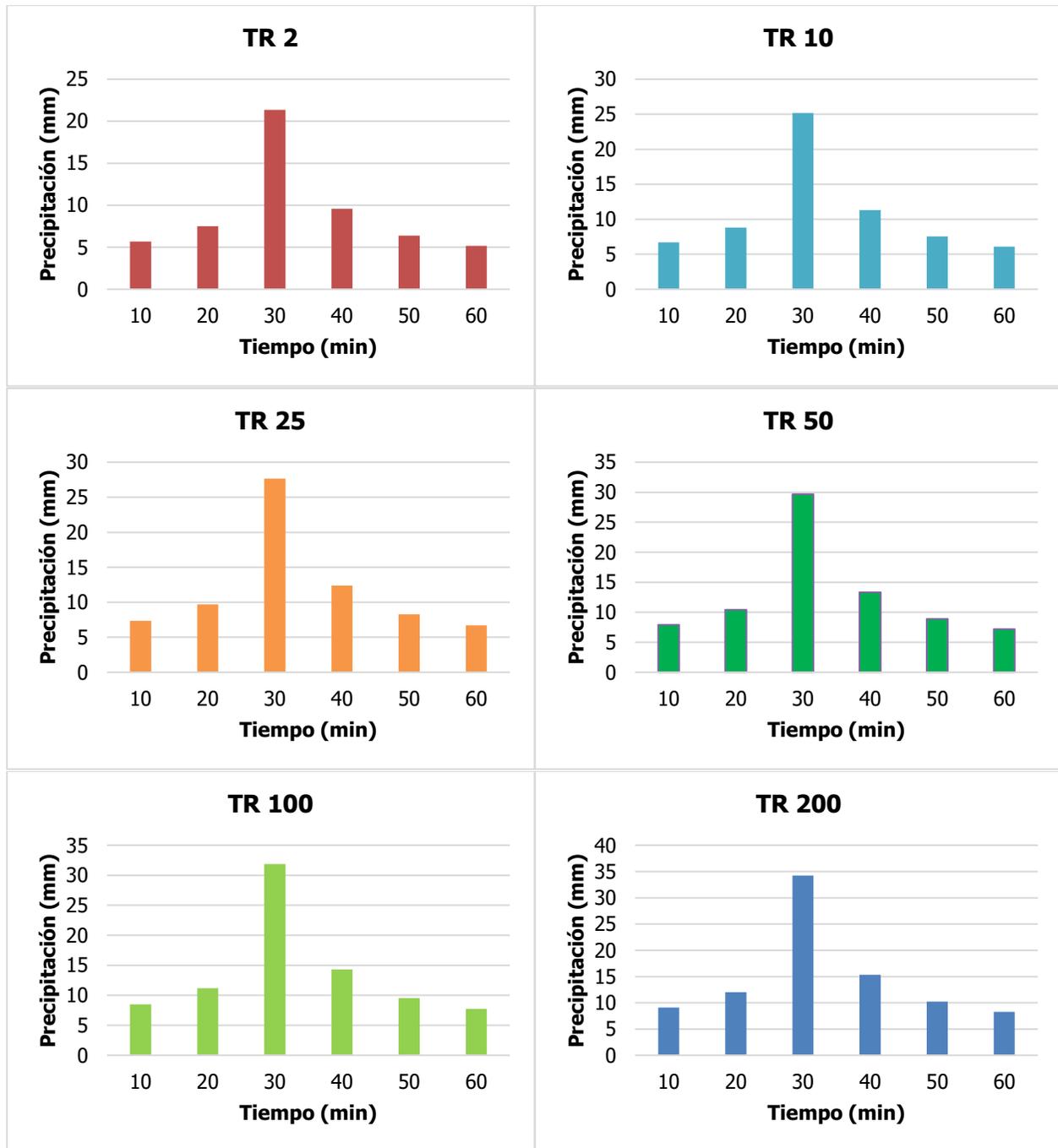


Gráfico 7. Hietogramas para diferentes periodos de retorno según el método de bloque alterno

## 4. Modelación hidrológica: determinación de caudales máximos

Para la determinación de caudales máximos, se emplearon tres métodos

- Modelación con el programa HEC-HMS en su versión 4.9 del Hydrologic Engineering Center del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos (USACE, por sus siglas en inglés).
- Método racional (empleado por D'Geo en su estudio del año 2021).
- Método Mac-Math (empleado por Geotécnica en su estudio del año 2021).

### 4.1 Hidrogramas con HEC-HMS

En este caso, para estimar los hidrogramas de respuesta de la cuenca se empleó el método del hidrograma unitario del Natural Resources Conservation Service (2010) para la transformación de la escorrentía. Como método de pérdidas se aplicó la metodología del número de curva y se asignaron los hietogramas del Gráfico 7. Además, se analizaron escenarios futuros de respuesta de las cuencas ante los cambios en el uso de suelo. Para ello, se modificó en el modelo hidrológico el número de curva y las abstracciones iniciales asociadas a cada cuenca.

En la Tabla 9 se resumen los parámetros ingresados al programa HEC-HMS para la modelación y en la Tabla 10 se muestran los caudales pico calculados con bloque alterno.

Tabla 9. Resumen de los parámetros usados en HEC-HMS

| Parámetro                                 | Cuenca tributaria del desfogue pluvial |      |      | Q. Rodríguez hasta el desfogue pluvial |      |      | Q. Rodríguez hasta la Ruta Nacional |      |      |
|---|--|------|------|--|------|------|-------------------------------------|------|------|
|   | 2023                                   | 2048 | 2073 | 2023                                   | 2048 | 2073 | 2023                                | 2048 | 2073 |
| Área de la cuenca (km <sup>2</sup> )      | 0.065                                  |      |      | 1.07                                   |      |      | 1.26                                |      |      |
| Número de curva                           | 79.9                                   | 80.9 | 82.1 | 81.1                                   | 81.5 | 81.9 | 81.3                                | 81.8 | 82.3 |
| Abstracciones iniciales (mm)              | 12.8                                   | 12.0 | 11.1 | 11.9                                   | 11.6 | 11.2 | 11.7                                | 11.3 | 10.9 |
| Tiempo de retardo: T <sub>Iag</sub> (min) | 8.0                                    |      |      | 10.8                                   |      |      | 13.1                                |      |      |

Tabla 10. Caudales pico para el método de bloque alterno

| TR (años)  | Cuenca tributaria del desfogue pluvial (m <sup>3</sup> /s) |      |      | Q. Rodríguez hasta el desfogue pluvial (m <sup>3</sup> /s) |       |       | Q. Rodríguez hasta la Ruta Nacional (m <sup>3</sup> /s) |       |       |
|------------|--|------|------|--|-------|-------|---|-------|-------|
|            | 2023   | 2048 | 2073 | 2023   | 2048  | 2073  | 2023  | 2048  | 2073  |
| <b>2</b>   | 0.48   | 0.52 | 0.56 | 7.88   | 8.07  | 8.29  | 9.21  | 9.52  | 9.83  |
| <b>10</b>  | 0.68   | 0.72 | 0.78 | 11.02  | 11.33 | 11.67 | 12.60   | 12.95 | 13.31 |
| <b>25</b>  | 0.82   | 0.87 | 0.93 | 13.30  | 13.63 | 14.00 | 14.89   | 15.27 | 15.65 |
| <b>50</b>  | 0.94   | 0.99 | 1.05 | 15.23  | 15.58 | 15.98 | 16.83   | 17.22 | 17.62 |
| <b>100</b> | 1.07   | 1.12 | 1.19 | 17.36  | 17.73 | 18.15 | 18.94   | 19.35 | 19.76 |
| <b>200</b> | 1.21   | 1.27 | 1.33 | 19.72  | 20.11 | 20.55 | 21.26   | 21.69 | 22.26 |

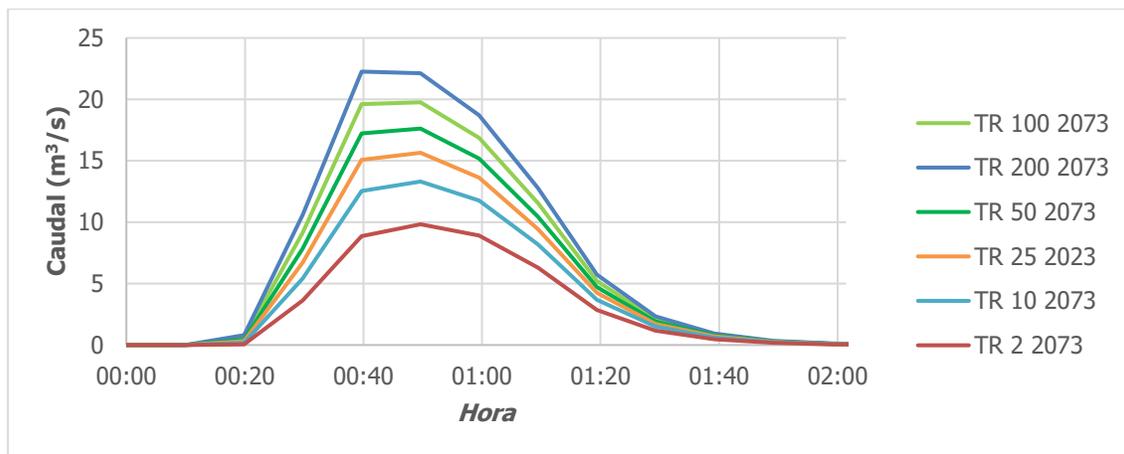


Gráfico 8. Hidrogramas modelados con HEC HMS para hasta la RN310

## 4.2 Método racional

Como metodología alterna se propone el uso de la fórmula racional para la determinación de caudales pico. Este método se puede utilizar por el tamaño de las cuencas bajo estudio, que hace adecuado el análisis mediante este método. La fórmula racional se determina según lo establece la ecuación 5.

$$Q_{pico} = \frac{C \cdot I \cdot A}{3.6} \quad (7)$$

En donde C es el coeficiente de escorrentía asociado a la cuenca, I es la intensidad de la precipitación en mm/h y A es el área de la cuenca en km<sup>2</sup>. Para evaluar el cambio en la respuesta producto de los cambios en el uso del suelo, en este método se modifica el coeficiente de escorrentía en los escenarios futuros. En la Tabla 11 se muestra la variación del coeficiente de escorrentía en el 2023, 2048 y 2073.

Tabla 11. Coeficientes de escorrentía de las cuencas estudiadas para el 2023, 2048 y 2073

| Cuenca  | TR  | Año 2023 | Año 2048 | Año 2073 |
|---|-----|----------|----------|----------|
| <b>Cuenca tributaria del desfogue pluvial</b> | 2   | 0.49     | 0.50     | 0.51     |
|   | 50  | 0.63     | 0.64     | 0.66     |
|   | 100 | 0.67     | 0.69     | 0.70     |
|   | 200 | 0.73     | 0.75     | 0.76     |
| <b>Q. Rodríguez hasta el desfogue pluvial</b> | 2   | 0.50     | 0.51     | 0.52     |
|   | 50  | 0.64     | 0.65     | 0.67     |
|   | 100 | 0.68     | 0.70     | 0.72     |
|   | 200 | 0.74     | 0.76     | 0.77     |
| <b>Q. Rodríguez hasta la Ruta Nacional</b>    | 2   | 0.52     | 0.54     | 0.57     |
|   | 50  | 0.66     | 0.69     | 0.73     |
|   | 100 | 0.70     | 0.74     | 0.77     |
|   | 200 | 0.76     | 0.79     | 0.82     |

A partir de la información anterior, se calculan los caudales picos en las cuencas para el escenario actual y los escenarios futuros. Los resultados del método racional se muestran en la Tabla 12.

Tabla 12. Caudales pico para el método racional

| Caudal pico por el método racional (m <sup>3</sup> /s) |  |      |      |  |       |       |                                     |       |       |
|--|--|------|------|--|-------|-------|-------------------------------------|-------|-------|
| TR (años)  | Cuenca tributaria del desfogue pluvial |      |      | Q. Rodríguez hasta el desfogue pluvial |       |       | Q. Rodríguez hasta la Ruta Nacional |       |       |
|  | 2023                                   | 2048 | 2073 | 2023                                   | 2048  | 2073  | 2023                                | 2048  | 2073  |
| <b>2</b>   | 1.06                                   | 1.10 | 1.16 | 14.19                                  | 14.48 | 14.77 | 15.53                               | 15.84 | 16.15 |
| <b>50</b>  | 1.87                                   | 1.96 | 2.07 | 25.37                                  | 25.77 | 26.57 | 27.64                               | 28.07 | 28.93 |
| <b>100</b>   | 2.13                                   | 2.25 | 2.35 | 28.96                                  | 29.83 | 30.26 | 31.53                               | 32.45 | 33.38 |
| <b>200</b>   | 2.49                                   | 2.59 | 2.69 | 33.87                                  | 34.80 | 35.27 | 36.83                               | 37.83 | 38.32 |

### 4.3 Método Mac-Math

El método Mac-Math deriva del método Racional, en él se supone que el caudal máximo ocurre para una duración igual al tiempo de concentración de la cuenca y se estima a partir de la siguiente ecuación:

$$Q_{pico} = 0.0091CIA^{4/5} S^{1/2} \quad (8)$$

Dónde:

Q, es caudal máximo con un periodo de retorno de T años, en m<sup>3</sup>/s.

C, coeficiente o actor de escorrentía de Mac-Math representa las características de la cuenca.

I, es la intensidad máxima de la lluvia, para una duración igual al tiempo de concentración (t<sub>c</sub>), y un periodo de retorno de T años, mm/h.

A, es el área de la cuenca, en Ha.

S, es la pendiente media del cauce principal, en %.

Aplicado las intensidades de lluvia estimada para la estación 84169 Aeropuerto Juan Santamaría y los coeficientes de escorrentía mostrados en la Tabla 11, para una pendiente media en la cuenca de la quebrada Rodríguez de 4.19% y en la alcantarilla de calle Rama La Cubilla de 2.12%, se obtuvieron los caudales pico indicados en la Tabla 13.

Tabla 13. Caudales pico para el método de Mac-Math

| TR<br>(años) | Cuenca tributaria del<br>desfogue pluvial<br>(m <sup>3</sup> /s) |      |      | Q. Rodríguez hasta el<br>desfogue pluvial<br>(m <sup>3</sup> /s) |       |       | Q. Rodríguez hasta la Ruta<br>Nacional<br>(m <sup>3</sup> /s) |       |       |
|--------------|--|------|------|--|-------|-------|---|-------|-------|
|              | 2023   | 2048 | 2073 | 2023   | 2048  | 2073  | 2023  | 2048  | 2073  |
| <b>2</b>     | 1.99   | 2.06 | 2.18 | 9.20   | 9.39  | 9.58  | 9.28  | 9.47  | 9.65  |
| <b>50</b>    | 3.51   | 3.67 | 3.88 | 16.51  | 16.77 | 17.29 | 16.44   | 16.71 | 17.23 |
| <b>100</b>   | 3.99   | 4.22 | 4.39 | 18.83  | 19.39 | 19.94 | 18.77   | 19.33 | 19.62 |
| <b>200</b>   | 4.66   | 4.85 | 5.03 | 22.00  | 22.60 | 22.89 | 21.96   | 22.56 | 22.86 |

#### 4.4 Caudales por emplear para la modelización

De las tres metodologías de cálculo empleadas para la estimación de caudales se puede apreciar que el método Racional sobre estima la escorrentía producida por las subcuencas en estudio. Mientras para las metodologías de HEC-HMS y Mac-Math, los caudales pico determinados son muy similares entre sí para las subcuencas de la quebrada Rodríguez hasta el punto de desfogue y hasta la RN 310. No obstante, difieren en los valores estimados para la cuenca tributaria del sistema pluvial de calle Ramal La Cubilla, donde el método Mac-Math sobreestima los resultados.

Debido a lo anterior, para la modelación hidrodinámica se emplearán los hidrogramas estimados por el método de HEC-HMS.

## 5. Modelación hidrodinámica

### 5.1 Metodología de modelado

Una vez completados los estudios hidrológicos se procedió a la elaboración de los modelos hidráulicos. Se elaboró un modelo hidráulico unidimensional con ayuda del programa HEC-RAS del Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos de América (USACE), para condición de flujo permanente y periodos de retorno de 2, 50, 100 y 200 años. Como insumos para estas modelaciones se utilizaron:

- a) la superficie generada a partir de la topografía levantada de la quebrada Rodríguez
- b) los caudales estimados por el método de **bloque alterno con cambio en el uso de suelo a 2073.**

La geometría considerada en la modelación consiste en secciones transversales al sentido del flujo principal con una separación máxima de 4.0 m entre cada una. Para el tramo de estudio se consideró un número de Manning para el lecho del río en el canal principal de  $0.033 \text{ s/m}^{1/3}$  mientras que para las llanuras de inundación se consideró un número de Manning de  $0.055 \text{ s/m}^{1/3}$ . Como condiciones de frontera se definió caudal pico de diseño para cada periodo de retorno a la entrada del modelo y profundidad normal a la salida del modelo.

### 5.2 Resultados de la modelación

En la Figura 2 se muestra el perfil de elevaciones máximas de flujo.

De la Figura 3 a la Figura 10 se presentan algunas secciones transversales que muestran los niveles resultantes de la modelación del tramo de interés, comprendido entre el costado norte del parqueo del Hospital Metropolitano y 400 m aguas bajo del paso de alcantarilla bajo la RN310 para los diferentes periodos de retorno.

La variación de la velocidad media de flujo en el cauce se graficó para los diferentes periodos de retorno en la Figura 11, las máximas velocidades se presentan a la salida de la alcantarilla de cuadro donde la quebrada cruza bajo la RN310, hecho que es consistente con el hueco de socavación existente en este sector.

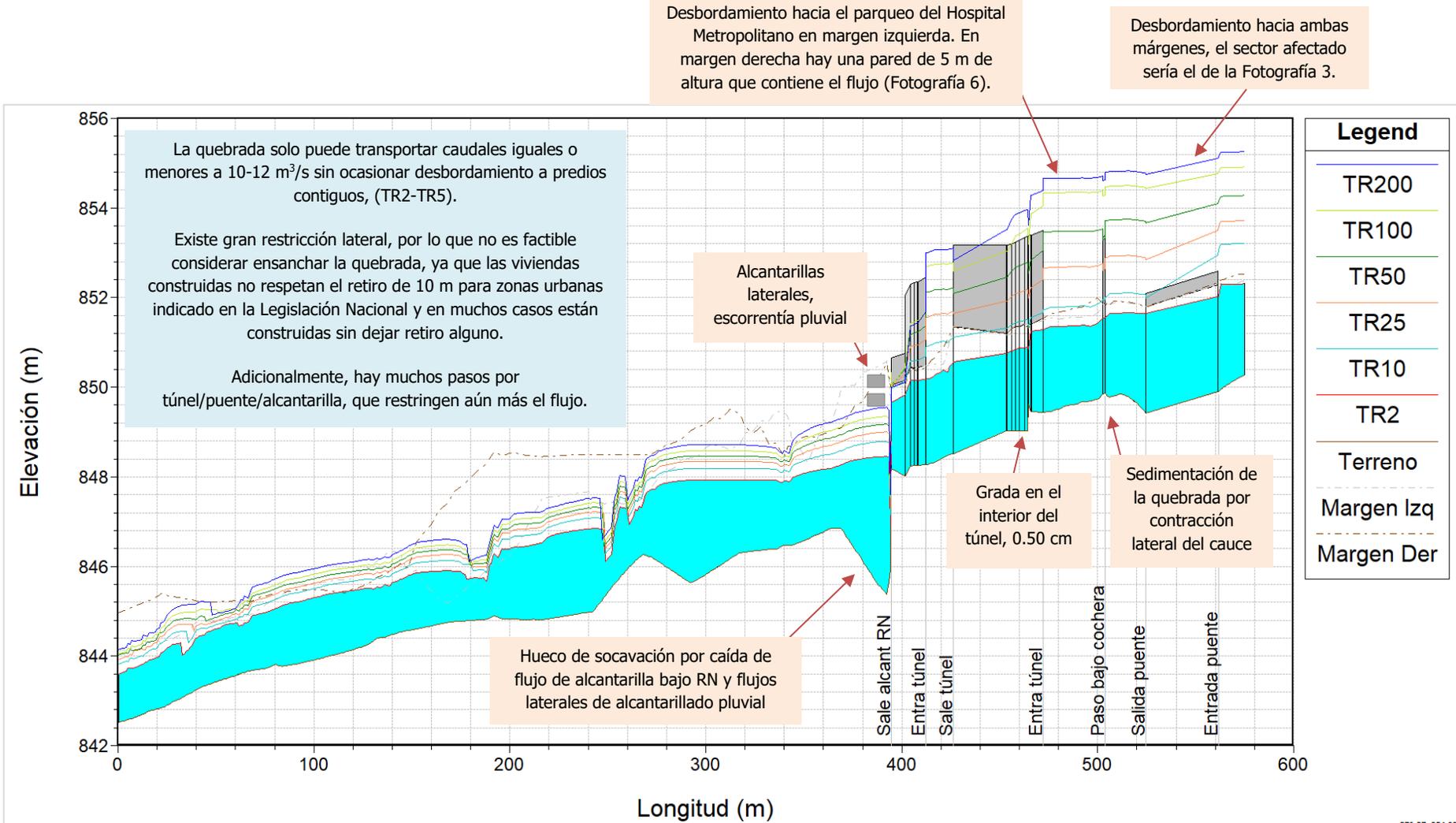


Figura 2. Perfil de flujo para las modelaciones de 2, 10, 25, 50,100 y 200 años de periodo de retorno

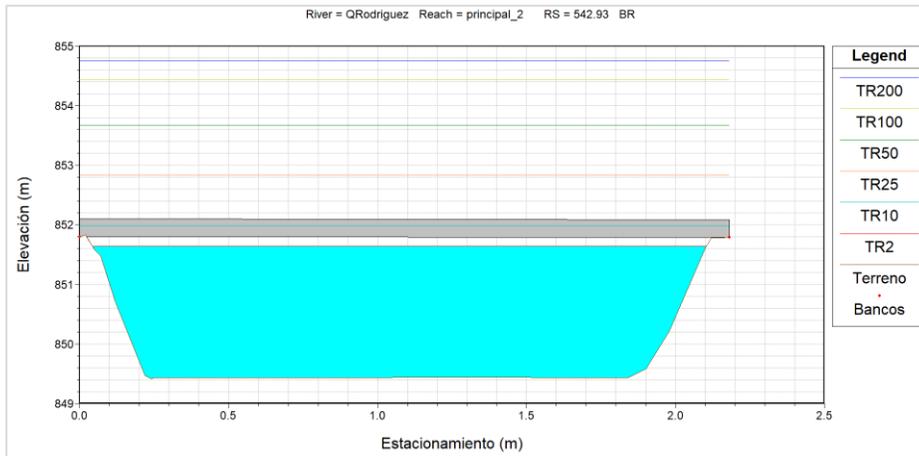


Figura 3. Niveles máximos en la sección transversal del estacionamiento 0+542.93 (Puente)

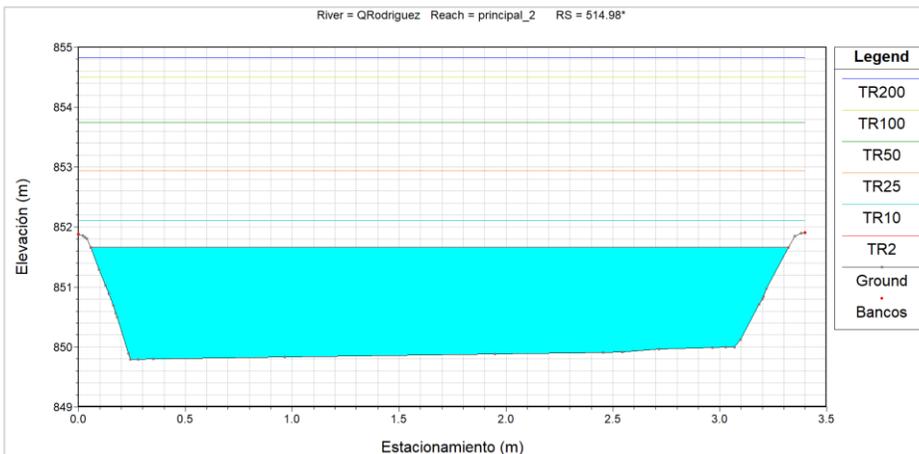


Figura 4. Niveles máximos en la sección transversal del estacionamiento 0+514.98 (flujo canal abierto)

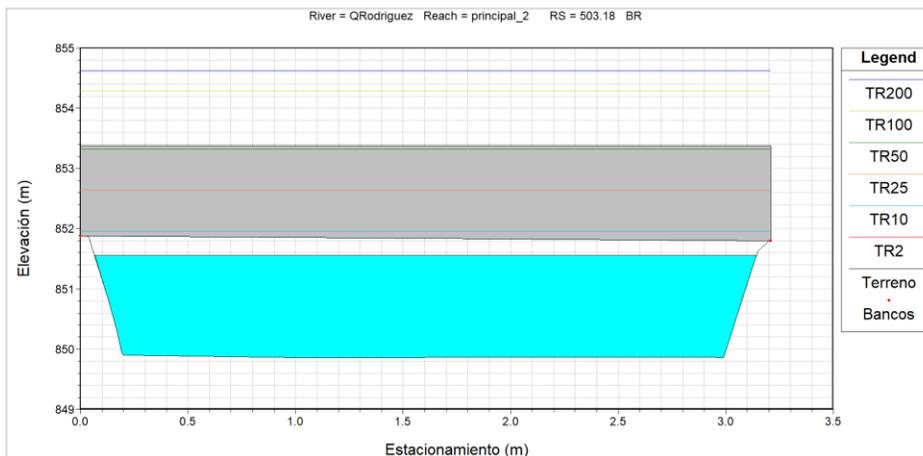


Figura 5. Niveles máximos en la sección transversal del estacionamiento 0+503.18 (paso bajo cochera)

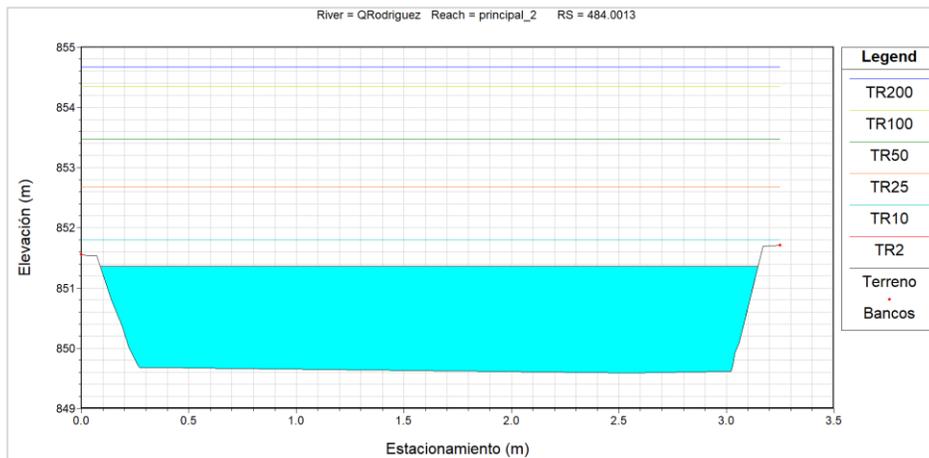


Figura 6. Niveles máximos en la sección transversal del estacionamiento 0+484.00 (flujo a canal abierto costado este parqueo Hospital Metropolitano)

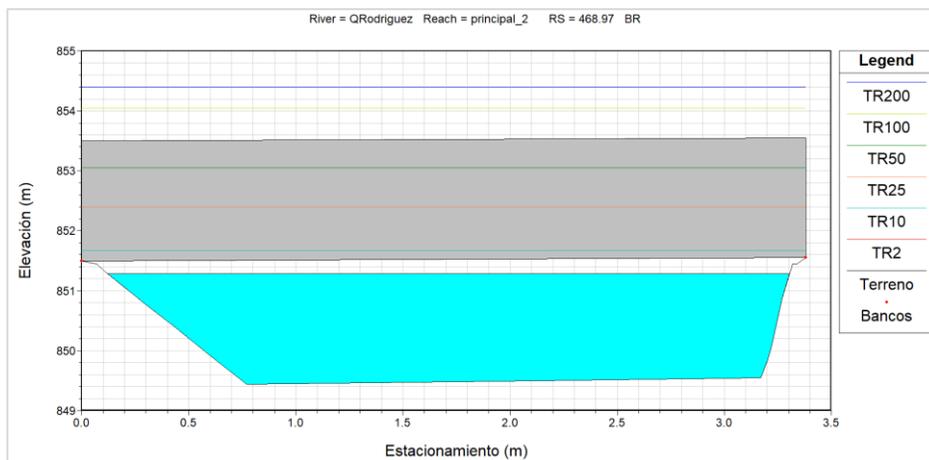


Figura 7. Niveles máximos en la sección transversal del estacionamiento 0+468.97 (Túnel bajo casas)

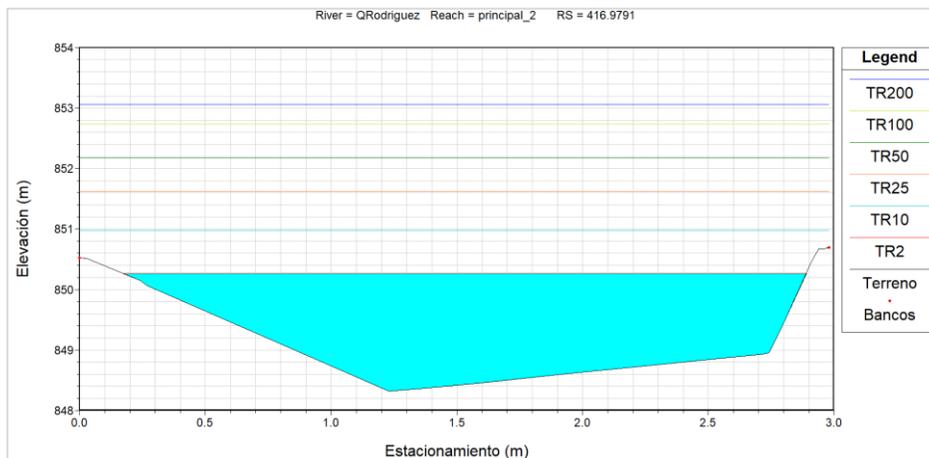


Figura 8. Niveles máximos en la sección transversal del estacionamiento 0+416.97 (flujo a canal abierto)

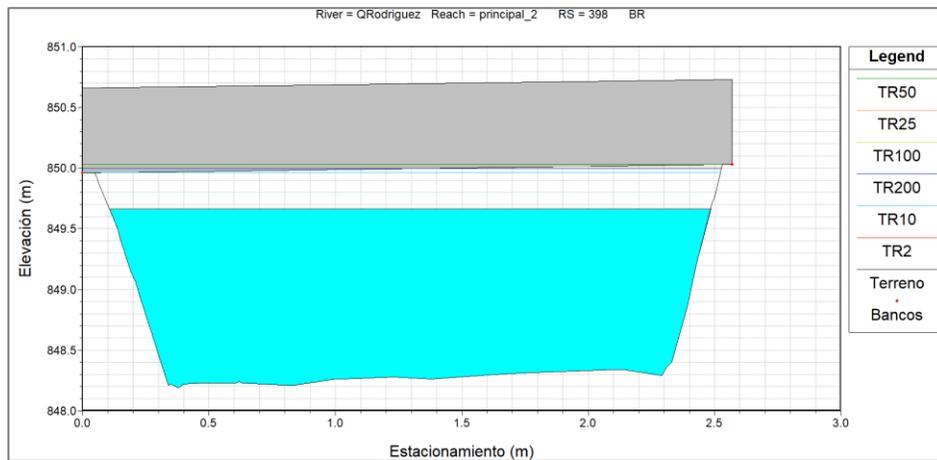
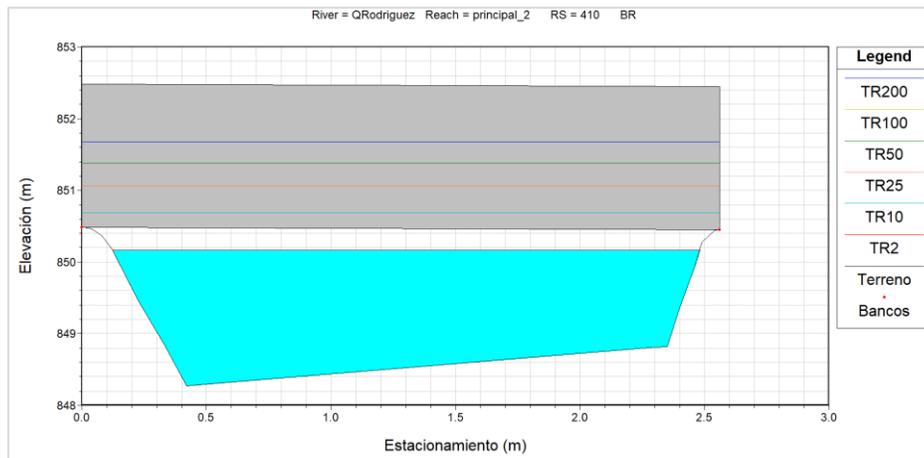


Figura 9. Niveles máximos en la sección transversal de los estacionamientos 0+410 y 0+398 (Túnel/alcantarilla a salir a la RN 310)

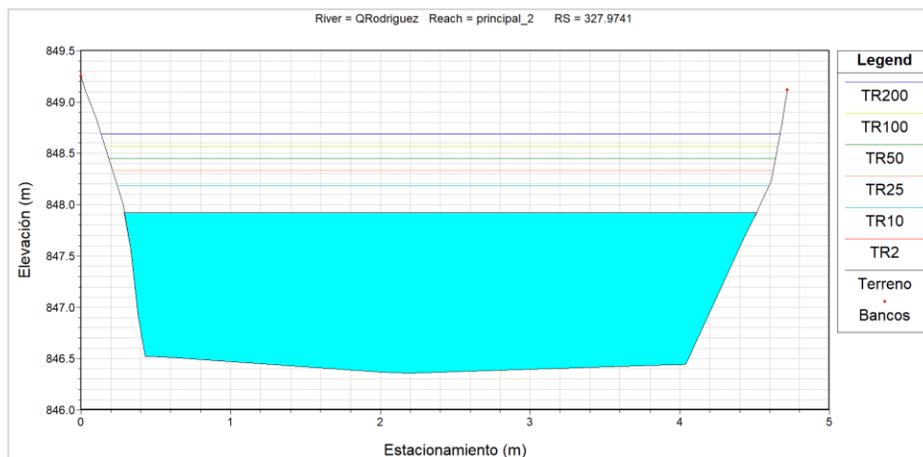


Figura 10. Niveles máximos de flujo en la sección transversal del estacionamiento 0+327.97 (flujo libre, aguas abajo RN)

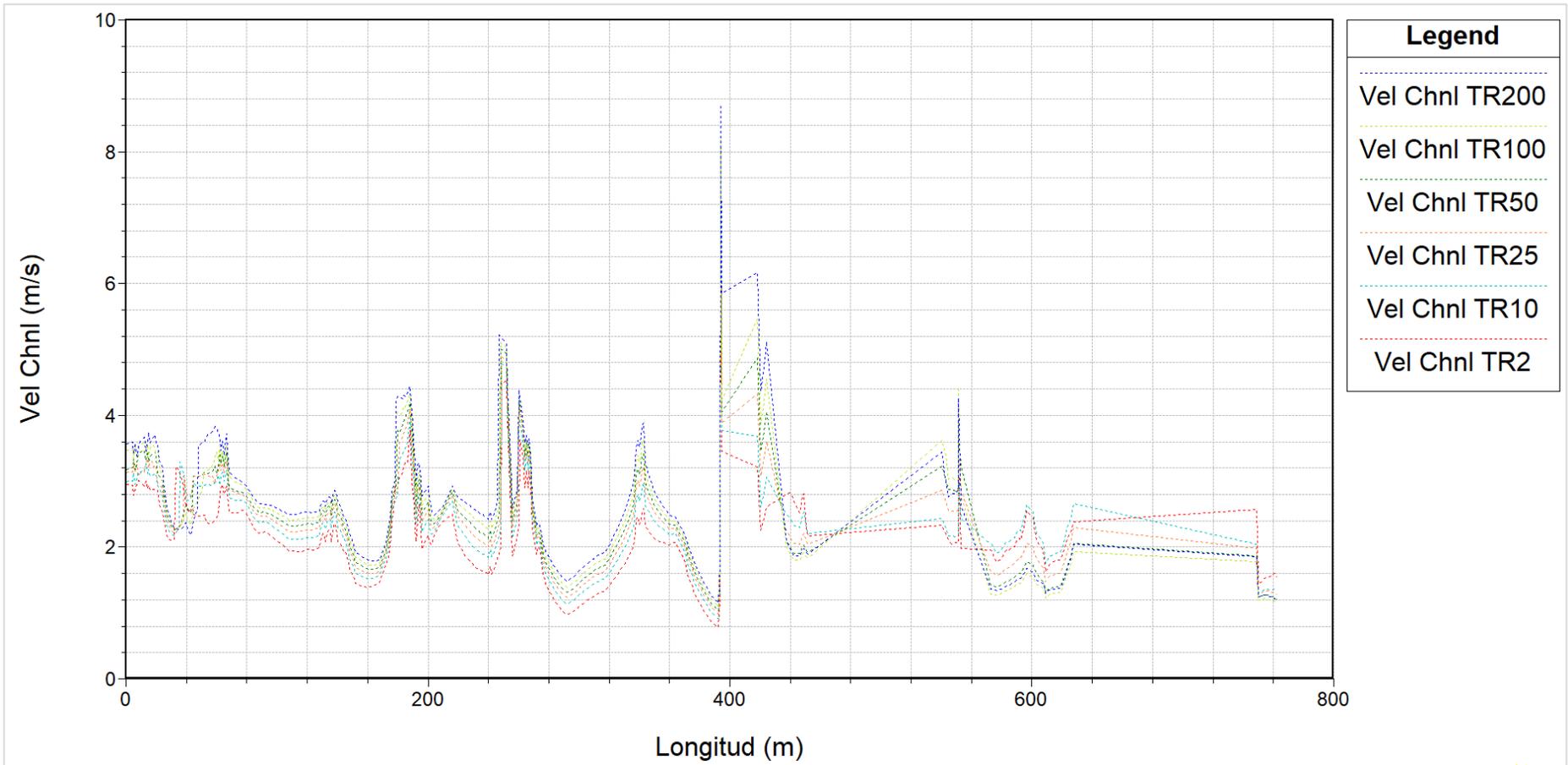


Figura 11. Perfil de velocidades de flujo para diferentes periodo de retorno

### 5.3 Estimación de la profundidad potencial de socavación

En este apartado se evalúa el riesgo de socavación en el lecho del cauce, para el sitio de interés. Este análisis es importante a la hora de definir los niveles de desplante de las estructuras que se construyen a las orillas de los ríos para protección de las márgenes. Para este análisis, y según visita al sitio se considera un material con diámetro representativo  $D_{50}$  de 0.05 m. Se estimó la socavación general considerando las ecuaciones de Neill, Blench, Lacey y el método de la velocidad competente o limitante.

#### 5.3.1 Ecuación de socavación general de Neill

La ecuación de socavación general de Neill se define como sigue a continuación:

$$y_f = y_i \left( \frac{q_f}{q_i} \right)^m \quad (9)$$

En la ecuación anterior,  $y_f$  es la profundidad de socavación por debajo del nivel de agua de la crecida de diseño (ft),  $y_i$  es la profundidad hidráulica para el caudal de cauce lleno (ft) que en este caso se toma como el caudal para el periodo de retorno de 2 años,  $q_f$  es el caudal específico de diseño ( $\text{ft}^3/\text{s}/\text{ft}$ ),  $q_i$  es el caudal específico de cauce lleno ( $\text{ft}^3/\text{s}/\text{ft}$ ) y  $m$  es un exponente que varía de 0.67 para arenas a 0.85 para gravas.

#### 5.3.2 Ecuación de socavación general de Blench

La ecuación de socavación general de Blench se define como sigue a continuación:

$$y_{f0} = \frac{q_f^{2/3}}{F_{b0}^{1/3}} \quad (10)$$

En la ecuación anterior,  $y_{f0}$  es la profundidad de agua para un transporte nulo de sedimentos del lecho (ft),  $q_f$  es el caudal específico de diseño ( $\text{ft}^3/\text{s}/\text{ft}$ ) y  $F_{b0}$  es el factor de transporte nulo de Blench ( $\text{ft}/\text{s}^2$ ), que se obtiene de la Figura 12.

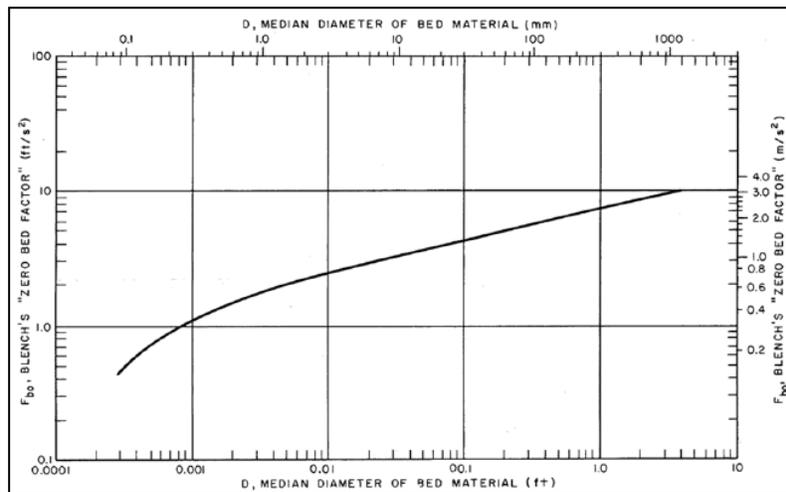


Figura 12. Factor  $f_{B0}$  de transporte nulo de Blench

### 5.3.3 Ecuación de socavación general de Lacey

La ecuación de socavación general de Lacey está definida como sigue a continuación:

$$y_m = 0.47 \left( \frac{Q}{f} \right)^{1/3} \quad (11)$$

En la ecuación anterior,  $y_m$  es la profundidad hidráulica del agua (ft) y  $Q$  es el caudal de diseño ( $\text{ft}^3/\text{s}$ ). Por su parte,  $f$  es el factor de Lacey que se define de la siguiente forma, donde  $D_m$  es el diámetro medio del material del lecho (mm).

$$f = 1.76(D_m)^{1/2} \quad (12)$$

Para calcular la profundidad de socavación por debajo del lecho se deben aplicar unos factores a cada una de las ecuaciones anteriores, los cuales depende de la geometría del cauce en el sitio de análisis. De esta manera, la profundidad de socavación para cada fórmula es:

$$\begin{aligned} y_s &= Zy_f \\ y_s &= Zy_{f0} \\ y_s &= Zy_m \end{aligned} \quad (13)$$

Los valores del factor de ajuste  $Z$  de las ecuaciones anteriores varían según la Tabla 14.

Tabla 14. Factores de ajuste de ecuaciones de socavación

| Método | Cauce recto | Curva moderada | Curva severa | Curva ángulo recto | Margen vertical de roca o pared |
|--------|-------------|----------------|--------------|--------------------|---------------------------------|
| Neill  | 0.50        | 0.60           | 0.70         | -                  | -                               |
| Blench | 0.60        | 0.60           | 0.60         | 1.25               | 1.25                            |
| Lacey  | 0.25        | 0.50           | 0.75         | 1.00               | 1.25                            |

### 5.3.4 Método de velocidad competente o limitante para socavación general

Por otro lado, también se tiene la metodología de velocidad competente o limitante, como se muestra en la ecuación siguiente:

$$y_s = y_m \left( \frac{V_m}{V_c} - 1 \right) \quad (14)$$

En la ecuación anterior  $y_s$  es la profundidad de socavación por debajo del nivel del lecho (ft),  $y_m$  es la profundidad hidráulica (ft),  $V_c$  es la velocidad competente promedio (ft/s) y  $V_m$  es la velocidad promedio (ft/s). Para este caso, se considera la velocidad competente como la velocidad crítica del material del lecho, que se calcula como sigue:

$$V_c = 6.19y^{1/6}D^{1/3} \quad (15)$$

En la ecuación anterior,  $V_c$  es la velocidad crítica (m/s),  $y$  es la profundidad de flujo (m) y  $D$  es el diámetro del material del lecho (m).

### 5.3.5 Perfil de socavación en la quebrada Rodríguez

La socavación general fue evaluada en distintos puntos a lo largo del cauce de la quebrada Rodríguez. El perfil socavado a lo largo del cauce se presenta en el Gráfico 9 para los periodos de retorno de 10, 50 y 200 años.

En la Tabla 15 se muestra el resultado de profundidad potencial promedio para la socavación general calculada para la quebrada Rodríguez, se descartaron los resultados obtenidos aplicando las ecuaciones de Lacey y Velocidad competente, ya que no son representativas para el sitio.

Se considera un factor de seguridad de 1.15.

Tabla 15. Resultados de socavación general potencial para TR10

| Método          | Estacionamiento |      |      |       |       |
|-----------------|-----------------|------|------|-------|-------|
|                 | TR10            | TR25 | TR50 | TR100 | TR200 |
| <b>Máxima</b>   | 1.92            | 2.16 | 2.35 | 2.56  | 2.79  |
| <b>Mínima</b>   | 0.79            | 0.88 | 0.97 | 1.06  | 1.13  |
| <b>Promedio</b> | 1.25            | 1.38 | 1.50 | 1.62  | 1.75  |

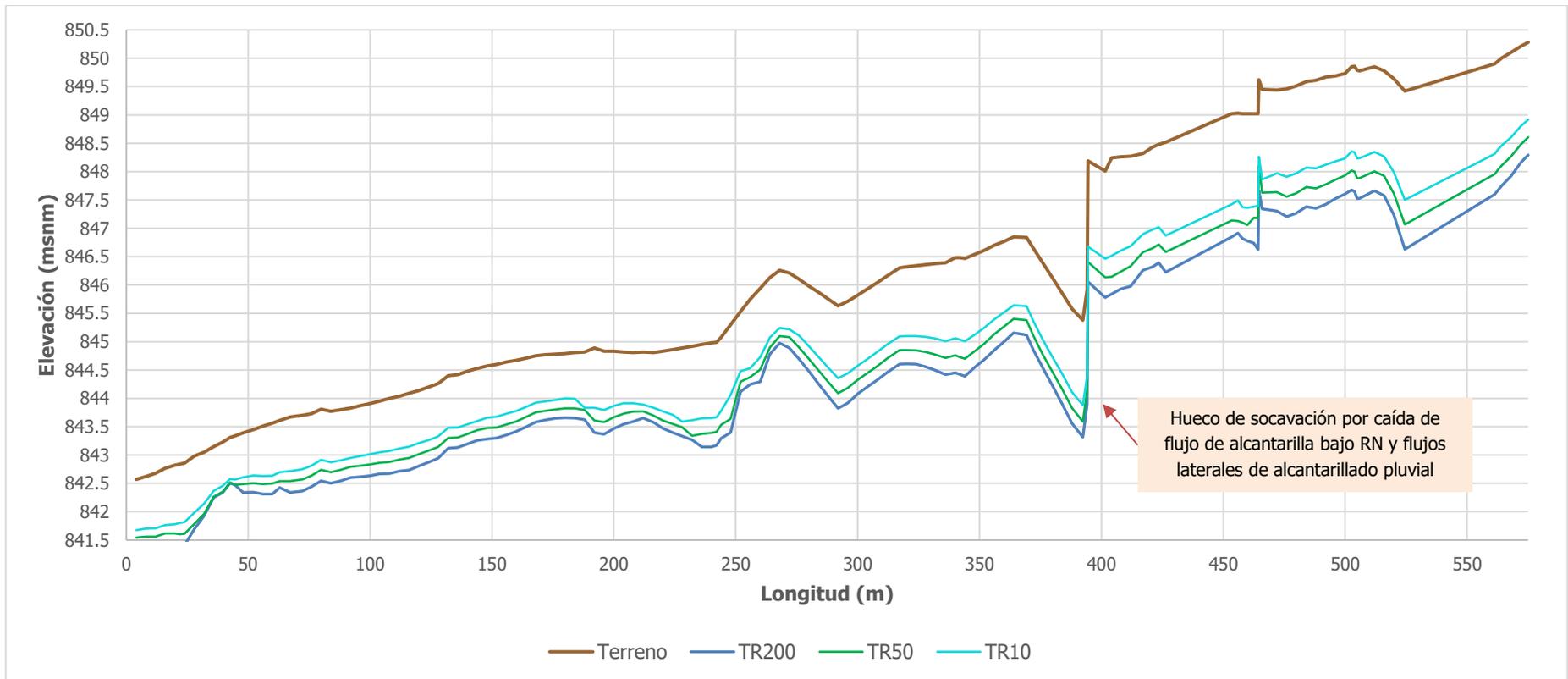


Gráfico 9. Perfil de socavación potencial general en la quebrada Rodríguez

## 5.4 Análisis de resultados del modelo hidráulico

En este apartado se discuten los principales resultados obtenidos tras modelar hidráulicamente la quebrada Rodríguez.

Dada la geometría de la quebrada Rodríguez en el tramo en estudio es evidente que su cauce solo puede transportar, sin ocasionar desbordamiento a predios contiguos, caudales iguales o menores a 10-12 m<sup>3</sup>/s, (TR2-TR5). Para flujos de mayor magnitud los niveles sobrepasan los hombros de los taludes en ambas márgenes, así como los tableros de los pasos por puente/túnel, lo que se aprecia en el perfil de la Figura 2.

Debido a lo anterior, es evidente que existe riesgo de inundación a los terrenos que limitan con la quebrada Rodríguez, principalmente, hacia el parqueo del Hospital Metropolitano, ya que la estructura que separa la quebrada y el terreno del parqueo es permeable (malla ciclón) y no un muro de concreto.

En lo que respecta a los pasos por túnel/puente localizados en las inmediaciones de la cochera (estacionamiento 0+502) y al costado del parqueo Metropolitano bajo las edificaciones existentes (estacionamiento 0+472), como se aprecia en las Fotografías 4, 5 y 6 se levantaron paredes de aproximadamente 1.5 m de alto y 2.00 m, respectivamente, que propician que el nivel se levante y restringe el paso al interior de los edificios. Sin embargo, ante eventos extremos, el nivel del agua podría llegar a superar estas barreras e ingresar a las edificaciones.

Como se observa en el perfil de la Figura 11 las velocidades son variables alcanzando un máximo de 7.0 m/s para el periodo de retorno de 50 años a la salida de la alcantarilla que pasa bajo la Ruta 310. En general, la velocidad del flujo se encuentra por debajo de los 5.5 m/s. Al contrastar el perfil de velocidades de la Figura 11 con el Gráfico 9 que muestra el perfil socavado del río para diversos periodos de retorno, se aprecia como ante mayores velocidades de flujola socavación del lecho se incrementa.

El potencial de socavación promedio es de 1.25 m para el caudal asociado al periodo de retorno de 10 años, esta estimación considera solo la socavación general, y podría verse afectado por la presencia de obstáculos en el cauce (socavación local) o curvas en la geometría del río (socavación en curva), lo cual se debe analizar de manera específica según el punto donde se plantee construir estructuras a futuro.

Uno de los puntos con mayor potencial de socavación se asocia con la estación 0+394, donde se localiza la salida de la alcantarilla que encausa las aguas de la quebrada Rodríguez bajo la Ruta 310, alcanzando una socavación de 1.53 m para TR10, 1.79 m para TR50 y 2.07 m para TR200. En este punto no se identificaron problemas de inundación por causa de los niveles de la quebrada, pero no se descarta que el mal funcionamiento de sistemas pluviales que descargan al cauce en este punto pueda estar ocasionando inundaciones en la vía en época de lluvia.

Es importante resaltar el hecho de que, no se conoce a ciencia cierta qué tan profundas son las cimentaciones de las estructuras construidas contiguo a la quebrada, como es el caso de los túneles/puentes existentes. Además, en algunos casos se trata de construcciones improvisadas (muros hechizos de cilindros de concreto), que podrían verse afectadas ante eventos extraordinarios. Actualmente, algunos de los pasos evidencian problemas estructurales. Por ejemplo, la integridad el cielo del túnel que pasa al costado este del parqueo del Hospital Metropolitano parece estar comprometida, lo que se muestra en la siguiente Fotografía.



Fotografía 12. Daño estructural en el techo del túnel por el que pasa la quebrada contiguo al parqueo del Hospital Metropolitano

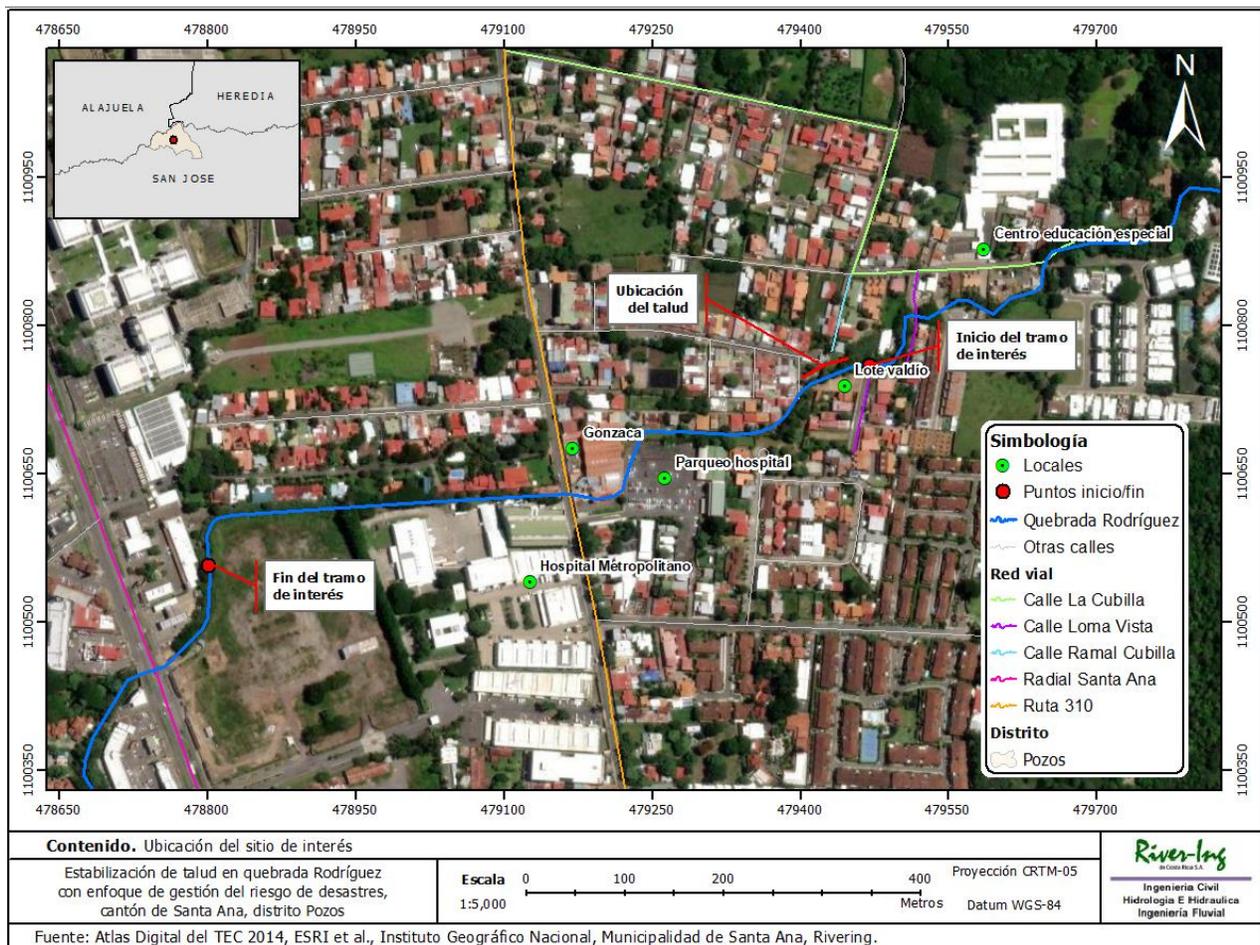
En el informe presentado por D'Geo en el año 2021 se expresaba la necesidad de ampliar la capacidad de la sección hidráulica en la quebrada, principalmente en tramos de baja pendiente donde los nivel en el cauce se incrementan. No obstante, aunque la necesidad de mayor capacidad en la quebrada Rodríguez es real y latente en toda su longitud, también es cierto que existe una gran restricción lateral en el tramo de interés, motivo por el cual **no se considera factible ensanchar el cauce**. Las edificaciones han sido construidas sin respetar el retiro mínimo que estipula la Legislación Nacional para zonas urbanas (10.0 m), en la mayoría de los casos dicho retiro es inexistente.

Tomando en consideración lo antes indicado, se puede optar por recubrir taludes y el lecho para reducir los problemas de erosión existentes, más no incrementar la capacidad del cauce. Si, por ejemplo, se considerara la opción de construir muros laterales o diques para impedir los procesos de inundación, estas nuevas restricciones laterales solo aumentarían el potencial de socavación y la capacidad de la quebrada para transportar el agua seguiría viéndose restringida por la capacidad hidráulica de los túneles, puentes y alcantarillas ya están construidos.

Se debe tener claro que, con el pasar de los años los problemas de erosión, socavación e inundación van a tender a incrementar, ello a consecuencia de la tendencia a impermeabilizar sectores que en la actualidad están cubiertos por pastos o bosques, lo que desencadenará mayores volúmenes de escorrentía, incrementando los niveles en la quebrada, misma que como se apreció no tiene espacio para incrementar su área hidráulica puesto que está confinada por infraestructura urbana.

## 6. Diseño de cabezal de alcantarilla y protección de ladera

Se requiere estabilizar el talud a la salida del desfogue pluvial de calle ramal Cubilla e intervenir el desfogue actual, proponiendo un cambio en la dirección de salida del flujo pluvial hacia la quebrada. Para elaborar la propuesta de diseño realizó un estudio integral que finalizó con la confección de los planos constructivos de las obras de mejoramiento y estabilización del talud sobre la quebrada y el desfogue pluvial.



Mapa 6. Localización del talud a proteger

### 6.1 Estudio geotécnico

En el terreno estudiado se proyectan construir obras de protección para la Quebrada Rodríguez. Dentro de estas obras se incluye una protección contra la erosión del talud, por lo que se debe estudiar la estabilidad ante el deslizamiento del talud.

En el sitio de obra la topografía presenta una inclinación moderada a fuerte. Se observa una gran cantidad de basura en el talud, además de pastos y árboles.

### 6.1.1 Objetivos del estudio geotécnico

El objetivo principal de esta investigación fue determinar los parámetros geotécnicos principales de los materiales presentes en el área de proyecto, utilizando como base las prospecciones ejecutadas.

Los objetivos específicos del presente estudio fueron los siguientes:

- Determinar el valor del parámetro  $N_{SPT}$  de cada uno de los sondeos.
- Estudiar la estabilidad ante el deslizamiento del terreno.
- Determinar el coeficiente sísmico según los lineamientos establecidos en el Código de Sísmico de Costa Rica (CFIA, 2014).

### 6.1.2 Metodología aplicada

Los trabajos de campo y laboratorio, así como todos los análisis geotécnicos fueron ejecutados siguiendo los lineamientos y metodologías presentados en el Código de Cimentaciones de Costa Rica (ACG, 2009) y el Código Geotécnico de Taludes y Laderas de Costa Rica (ACG, 2015).

### 6.1.3 Trabajo realizado: perforaciones

En el sitio de estudio se realizó a solicitud un sondeo exploratorio SPT (Tabla 16), el cual alcanzó una profundidad de 6.60 m. El sondeo fue ejecutado por medio del ensayo de penetración estándar (SPT), siguiendo el procedimiento de la norma ASTM D1586.

Tabla 16. Perforaciones SPT realizadas

| Perforación   | Profundidad (m) | Nivel freático (m) | Coordenada X (CRTM-05) | Coordenada Y (CRTM-05) |
|---------------|-----------------|--------------------|------------------------|------------------------|
| <b>SPT-01</b> | 6.60            | 2.90               | 479 432                | 1 100 752              |

### 6.1.4 Resultados geotécnicos obtenidos

Con base en la información de los SPT, se ha definido que el perfil geotécnico típico del terreno está conformado por tres unidades geotécnicas (UG), la cual se presenta en la Tabla 17.

Tabla 17. Perfil geotécnico típico del terreno

| Unidad       | Descripción   |
|--------------|---|
| <b>UG-01</b> | Limo arcilloso. Consistencia muy blanda a blanda. Intercalada con la UG-02. |
| <b>UG-02</b> | Limo areno arcilloso. Consistencia media. Intercalada con la UG-01.         |
| <b>UG-03</b> | Limo arenoso. Compacidad media a densa. Subyace la UG-01 y                  |

En la Tabla 18 se presentan los parámetros inferidos de las unidades geotécnicas con base en los resultados de las prospecciones realizadas. En los anexos se pueden consultar los registros de perforación y los resultados de los ensayos de laboratorio.

Tabla 18. Parámetros geotécnicos inferidos

| Unidad  | UG-01 | UG-02 | UG-03  |
|---|-------|-------|--------|
| <b>Número de golpes, NSPT</b>                                   | 1-4   | 4-8   | Rebote |
| <b>Peso volumétrico del suelo, (KN/m<sup>3</sup>)</b>           | 17    | 18    | 20     |
| <b>Ángulo de fricción efectiva, <math>\phi'</math> (grados)</b> | 20-25 | 25-28 | 30-35  |
| <b>Cohesión efectiva, <math>c'</math> (kPa)</b>                 | 5-10  | 5-10  | 5-10   |

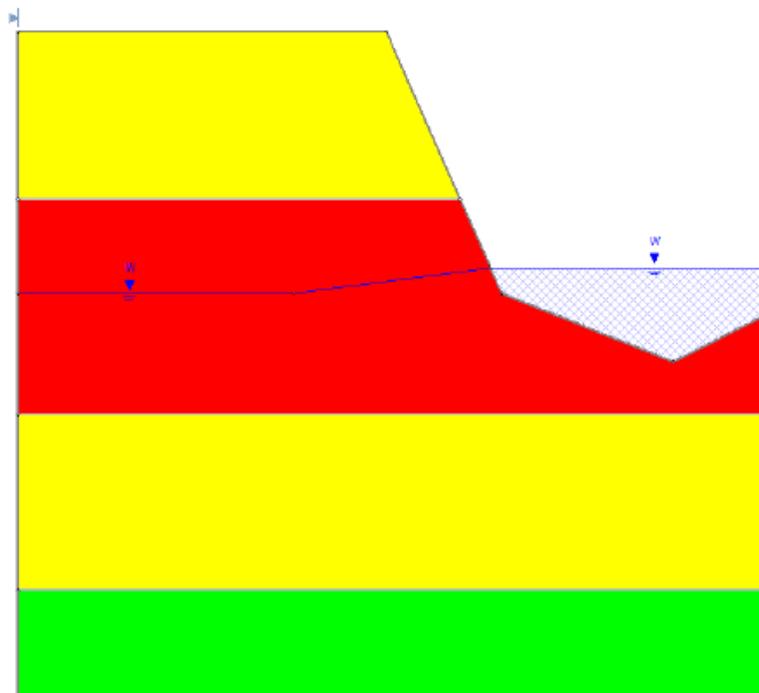


Figura 13. Modelo geotécnico del sitio en estudio

## 6.1.5 Evaluación de resultados y conclusiones geotécnicas

### 6.1.5.1 Arcillas expansivas, limos colapsables o arenas licuables

Según las observaciones realizadas en campo, los resultados de los ensayos de campo, la caracterización en laboratorio realizada en estudios precedentes y su comparación con los datos presentados en el Cuadro 1.1 y el apartado 8.1, ambos del CCCR (ACG, 2009), no se identificó la presencia de limos colapsables, arcillas con potencial expansivo o limos colapsables.

### 6.1.5.2 Coeficiente sísmico para el diseño

Con base en las prospecciones realizadas, se recomienda considerar el depósito de suelo como un sitio de cimentación tipo  $S_3$ , en Zona III (CFIA, 2014), por lo que la aceleración pico efectiva de diseño es  $a_{ef}=0.36$ .

Según ACG (2015), en el estudio de la estabilidad de taludes y el diseño de obras de retención se recomienda utilizar un coeficiente pseudoestático horizontal  $k_h=0.20$ .

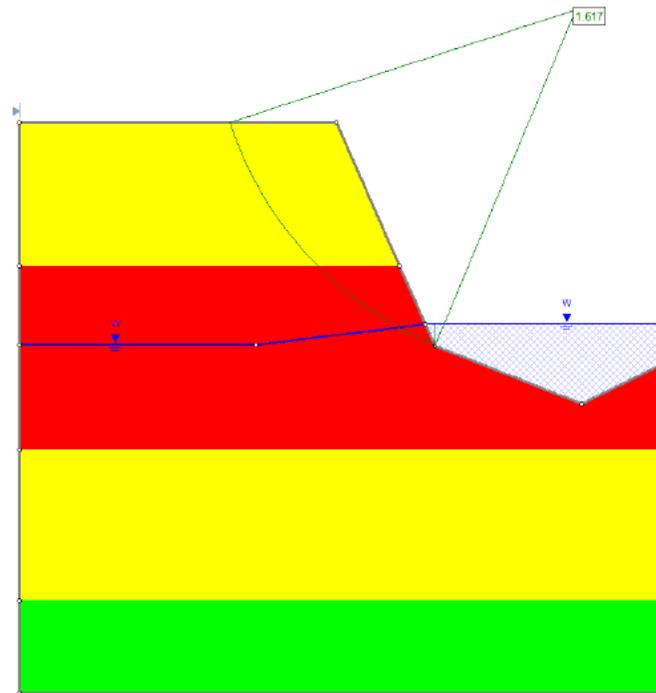
### 6.1.5.3 Análisis de estabilidad ante el deslizamiento

Con base en el modelo geotécnico, fue calculado el factor de seguridad (FS) ante el deslizamiento en condición estática y pseudoestático ( $k_h=0.20$ ).

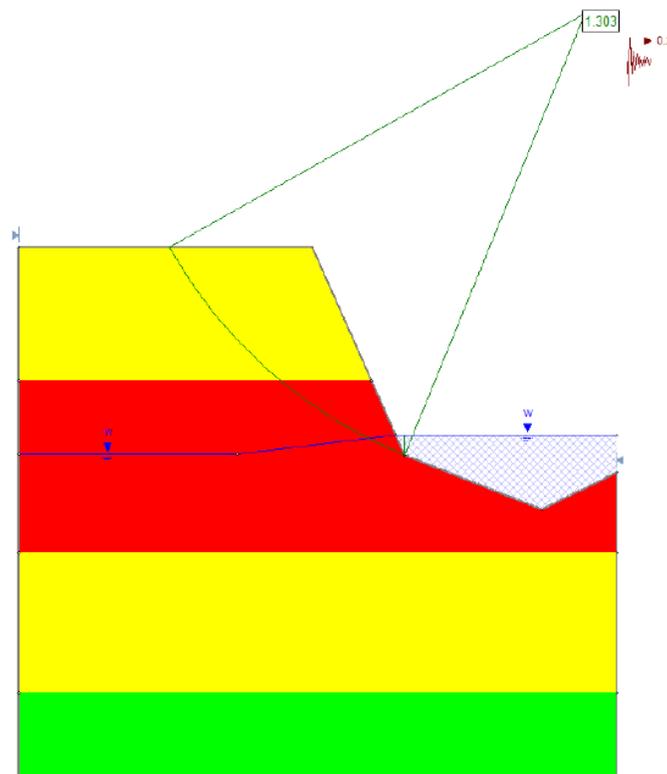
Los resultados obtenidos para la condición actual del talud se presentan en la Tabla 19. Para esta condición se presentan factor de seguridad mayores a los recomendados en la normativa geotécnica nacional vigente, donde se sugiere un FS mayor de 1.40 en condición estática y mayor de 1.05 para condición pseudoestático.

Tabla 19. Resultados del análisis de estabilidad en la condición actual

| FS estático | FS pseudoestático |
|-------------|-------------------|
| 1.61        | 1.30              |



Análisis estático



Análisis sísmico

Figura 14. Resultados del análisis de estabilidad

Por lo anterior, solamente se recomienda colocar un manto para prevenir problemas de erosión en la margen del talud y así garantizar su estabilidad a largo plazo. El tratamiento propuesto incluye lo siguiente:

- Manto de control de erosión tipo Pyramat 25 o similar.
- Anclajes de varilla No. 3 G60, con una longitud de anclaje mínima de 50 cm.
- Se deben colocar 2 anclajes por metro cuadrado de manto.
- En el perímetro y los traslapes del manto se deben colocar anclajes adicionales para una distancia máxima entre anclajes de 50 cm.

#### **6.1.6 Conclusiones y recomendaciones geotécnicas**

Con base en los estudios realizados, se definió el modelo geotécnico para el análisis de la estabilidad, el cual está conformado por tres unidades geotécnicas. En las prospecciones fue identificado el nivel freático a 2.90 m, coincidente con el nivel del agua en el cauce de la quebrada.

Con base en los análisis de estabilidad, se calculó el factor de seguridad ante el deslizamiento del talud en su condición actual. Tanto para la condición estática y como para la condición pseudoestática (sismo), los factores de seguridad son mayores a los indicados como admisibles en la normativa geotécnica nacional vigente.

Se recomienda colocar un manto para control de erosión según lo indicado en el apartado 4 de este documento, con el fin de garantizar el adecuado desempeño del talud estudiado.

#### **6.2 Capacidad de soporte admisible**

Con base en las características geotécnicas del terreno, se determina la capacidad de soporte en el pie del talud. Se debe de considerar las siguientes características que presenta la zona de estudio.

a) El suelo en el sitio está compuesto por depósitos transportado-aluviales (D'Geo, 2021).

b) Se utilizarán los parámetros efectivos estimados para la unidad geotécnica 1, que consiste en un limo arcilloso con una densidad de  $17 \text{ KN/m}^3$ , un ángulo de fricción de  $25^\circ$  y una cohesión de 5 KPa.

Para la fundación de estructuras se calculó el valor de capacidad soportante admisible neta, por medio de la ecuación de capacidad de soporte propuesta por Meyerhof dada por:

$$Q_{ult} = C_2 N_c F_{cd} F_{ci} + D_f (\gamma_2 - \gamma_w) N_q F_{qd} F_{qi} + \frac{1}{2} (\gamma_2 - \gamma_w) B' N_\gamma F_{\gamma d} F_{\gamma i} \quad (16)$$

Donde  $B'$  es el ancho de la placa corregido por la excentricidad de carga,  $\gamma_2$  es el peso volumétrico del suelo por debajo del nivel de desplante,  $c_2$  es la cohesión efectiva del material,  $D_f$  es el nivel de desplante,  $N_c / N_q / N_\gamma$  corresponden a factores de capacidad de carga.

La capacidad soportante admisible para la estructura diseñada es de 10.2 ton/m<sup>2</sup>, considerando un factor de seguridad de 3.0 contra la falla por cortante del suelo y garantiza que bajo la presión de fundación recomendada los asentamientos no serán significativos.

Los sondeos SPT son pruebas puntuales, por lo que están sujetas a las condiciones existentes en campo. Durante el proceso de construcción se verificarán las condiciones de capacidad de soporte recomendadas en este reporte.

### 6.3 Diseño propuesto

Se propone la construcción de un cabezal de alcantarilla en concreto armado de 3.5 m de largo, 2.0 de ancho y 2.0 m de alto, con un espesor de pared de 0.25 m. El refuerzo se hará con varilla No. 4 grado 60 a cada 0.15 m en ambas direcciones. El concreto tendrá una resistencia de 210 kg/cm<sup>2</sup>. Para reducir el riesgo de socavación a la salida del cabezal, se propone recubrir el lecho de la quebrada con concreto ciclópeo en una longitud de 2.50 m aguas arriba y aguas abajo medidos de la línea de centro del cabezal, con un espesor de recubrimiento de 0.25 m.

La tubería existente no será sustituida, solo será cortada para dar lugar al cabezal, el cual estará ubicado de forma perpendicular al eje de la quebrada. El flujo de la alcantarilla impactará la pared del cabezal de manera oblicua esto ocasionará pérdidas de energía. Para incrementar las pérdidas de energía, se propone la construcción de una pared de 1.00 m de alto en la salida del cabezal, como se muestra en la Figura 16.

Adicionalmente, aguas arriba del cabezal se plantea la colocación de un manto de control de erosión tipo Pyramat 25 que recubra una extensión de terreno 7.0 m de longitud y 4.0 m de altura de talud, con anclajes de varilla No. 3 grado 60 y una longitud mínima de anclaje de 0.5 m, distribuyendo dos anclajes por metro cuadrado. Previo a la colocación del manto se hará una limpieza del terreno para retirar la maleza y desechos presentes en el área.

A continuación, se presentan los detalles de la obra propuesta, para más información el lector puede referirse a los planos enviados junto con este informe.

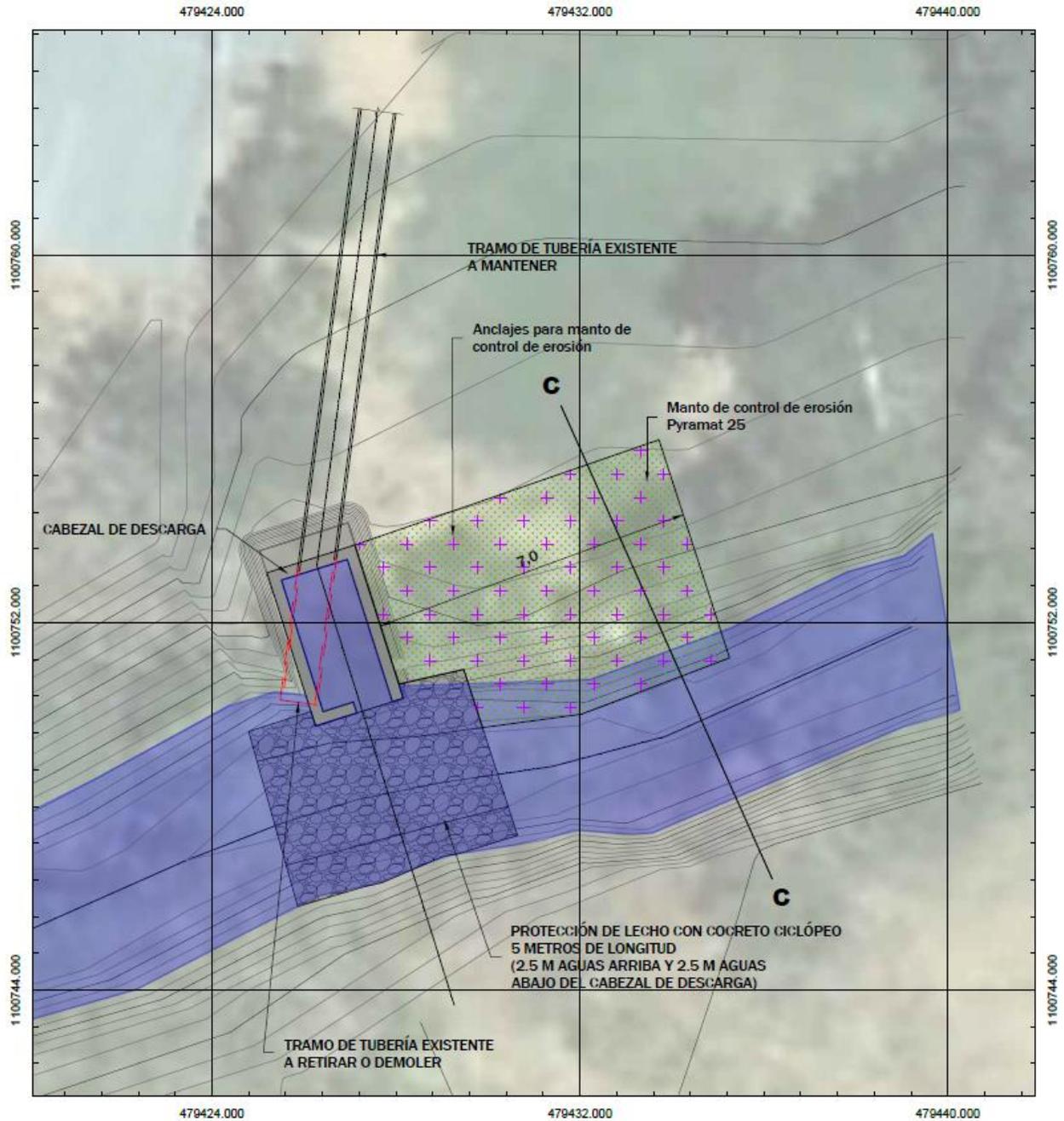


Figura 15. Vista en planta de la solución propuesta

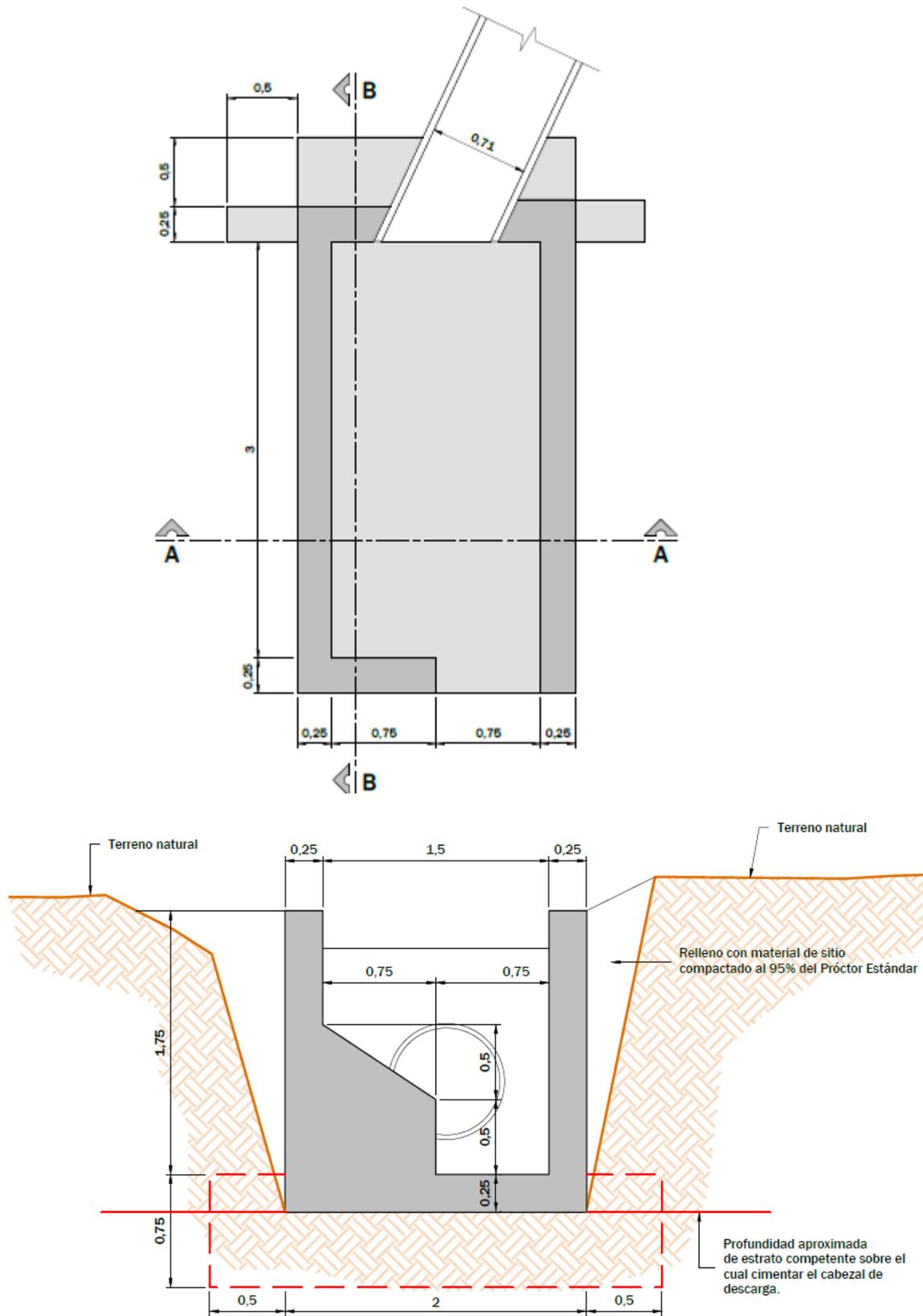


Figura 16. Vista en planta y frontal del cabezal de descarga

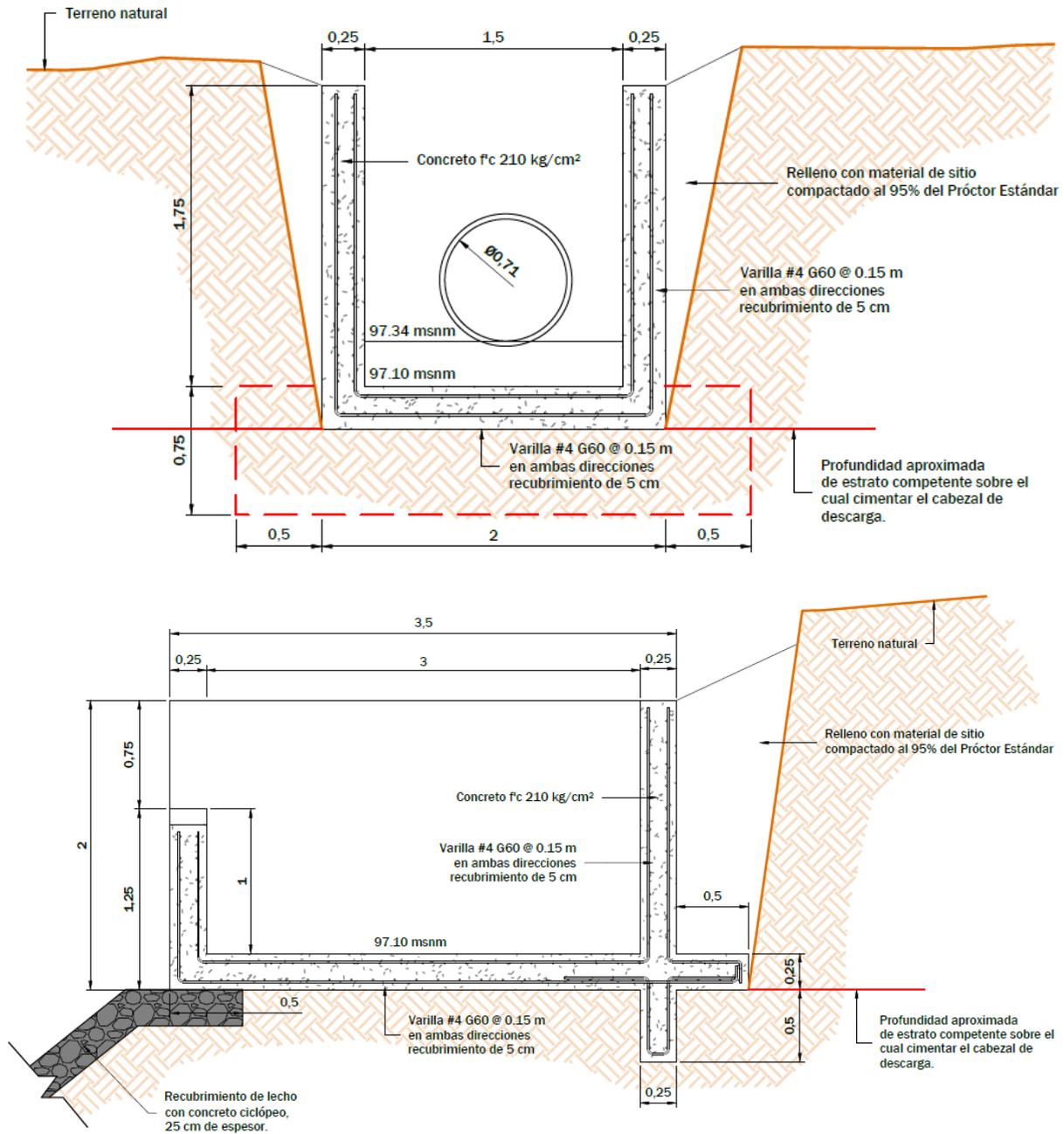


Figura 17. Cortes transversales con detalle de acero del cabezal de descarga

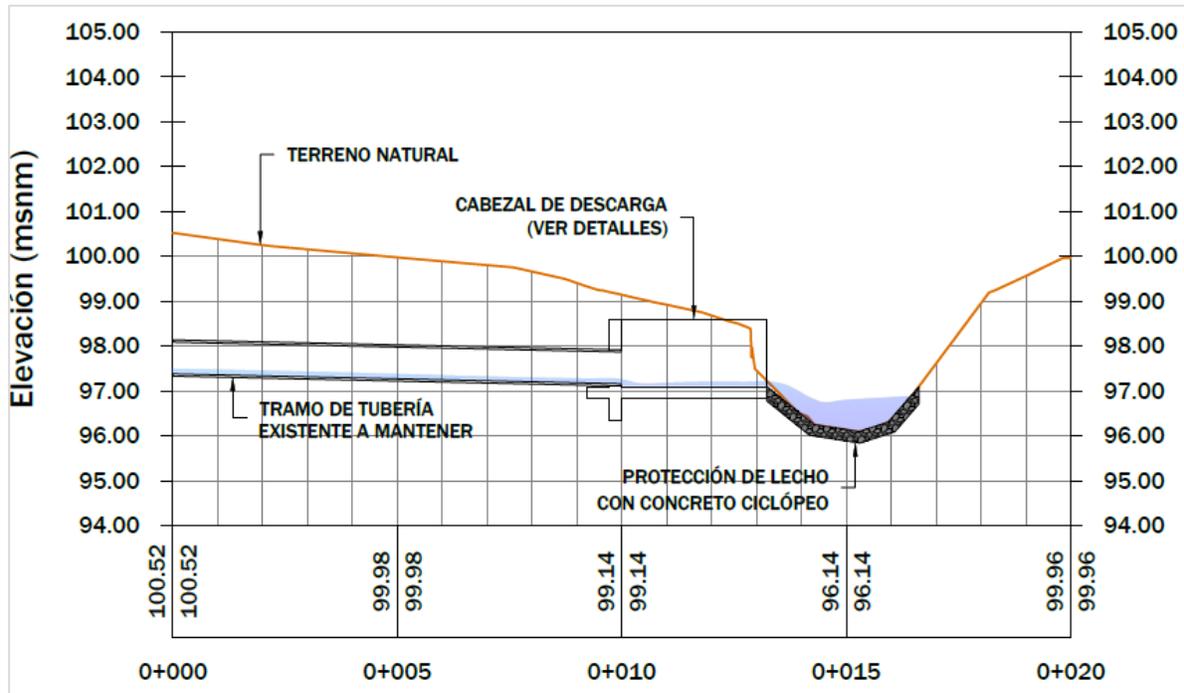


Figura 18. Vista del conjunto cabezal-protección de lecho con concreto ciclópeo

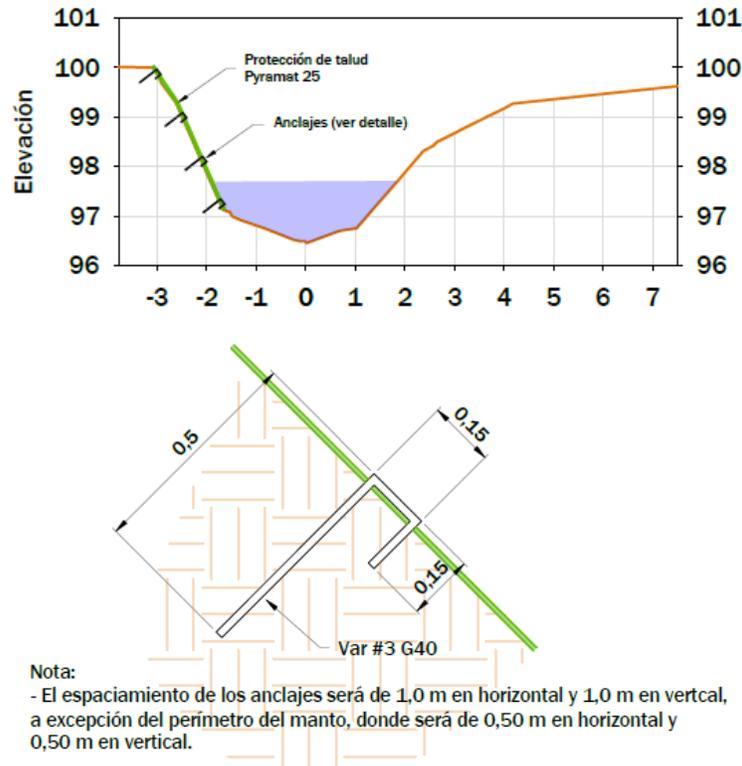


Figura 19. Protección de talud con un manto de control de erosión Pyramat 25

## 6.4 Presupuesto de obra

El costo estimado de la obra es de doce millones doscientos sesenta y siete mil doscientos cincuenta y nueve colones con cinco céntimos, ₡ 12 267 259.05 IVAi. En la Tabla 20 se muestra el desglose por actividad de costos directos, los costos indirectos contemplados y los porcentajes de utilidad, administración e imprevistos.

Tabla 20. Presupuesto de construcción estimado para el proyecto

| Costos directos                                 |   |                |                |                        |                |
|---|---|----------------|----------------|------------------------|----------------|
| Ítem  | Unidad  | Cantidad       | Costo Unitario | Subtotal               |                |
| 1   | Construcción de cabezal de descarga               | und            | 1              | ₡ 2 749 353.72         | ₡ 2 749 353.72 |
| 2   | Concreto ciclópeo para protección de lecho        | m <sup>3</sup> | 5              | ₡ 61 964.89            | ₡ 309 824.46   |
| 3   | Protección de margen con Manto Pyramat 25 anclado | m <sup>2</sup> | 28             | ₡ 20 000.00            | ₡ 560 000.00   |
| 4   | Topografía para construcción                      | global         | 1              | ₡ 750 000.00           | ₡ 750 000.00   |
| <b>Total, de costos directos</b>                |   |                |                | <b>₡ 4 369 167.18</b>  |                |
| Costos indirectos                               |   |                |                |                        |                |
| Ítem  | Unidad  | Cantidad       | Costo Unitario | Subtotal               |                |
| 1   | Maestro de obras                                  | semanas        | 5              | ₡ 225 000.00           | ₡ 1 125 000.00 |
| 2   | Ingeniero civil                                   | semanas        | 5              | ₡ 318 750.00           | ₡ 1 593 750.00 |
| 3   | Electricidad                                      | semanas        | 5              | ₡ 7 725.00             | ₡ 38 625.00    |
| 4   | Agua  | semanas        | 5              | ₡ 7 725.00             | ₡ 38 625.00    |
| 5   | Bodegas   | m <sup>2</sup> | 10             | ₡ 25 750.00            | ₡ 257 500.00   |
| 6   | Cabañas sanitarias                                | semanas        | 5              | ₡ 16 950.00            | ₡ 84 750.00    |
| 7   | Comunicación                                      | semanas        | 5              | ₡ 25 750.00            | ₡ 128 750.00   |
| 8   | Limpieza final                                    | global         | 1              | ₡ 250 000.00           | ₡ 250 000.00   |
| 9   | Pólizas   | global         | 1              | ₡ 150 000.00           | ₡ 150 000.00   |
| 10  | Seguridad ocupacional                             | global         | 1              | ₡ 100 000.00           | ₡ 100 000.00   |
| 11  | Mezcladora de concreto                            | semanas        | 5              | ₡ 60 000.00            | ₡ 300 000.00   |
| 12  | Transporte  | semanas        | 5              | ₡ 64 375.00            | ₡ 321 875.00   |
| <b>Total, de costos indirectos</b>              |   |                |                | <b>₡ 4 388 875.00</b>  |                |
| <b>Subtotal de costos directos e indirectos</b> |   |                |                | <b>₡ 8 758 042.18</b>  |                |
| <b>Imprevistos (10%)</b>                        |   |                |                | <b>₡ 875 804.22</b>    |                |
| <b>Costos administrativos (10%)</b>             |   |                |                | <b>₡ 875 804.22</b>    |                |
| <b>Utilidad (20%)</b>                           |   |                |                | <b>₡ 1 751 608.44</b>  |                |
| <b>Total, del proyecto</b>                      |   |                |                | <b>₡ 12 261 259.05</b> |                |

## **7. Discusión sobre los grados de incertidumbre y alcance del estudio**

Los resultados presentados en este estudio son solo aplicables para la cuenca de la quebrada Rodríguez, en Pozos de Santa Ana.

Durante el proceso de construcción debe verificarse las condiciones de capacidad de soporte recomendadas en este informe.

La principal fuente de incertidumbre en cualquier estudio hidrológico proviene de la información meteorológica utilizada. Aunque se estima que la información presentada en este informe es correcta, no se descarta que a futuro pueda perder validez producto de procesos asociados al cambio climático.

En términos geotécnicos el grado de incertidumbre en los resultados está sujeto a las incertidumbres y alcances de los métodos de análisis utilizados.

## 8. Fuentes de consulta

Asociación Costarricense de Geotecnia (ACG). 2015. Código Geotécnico de Taludes y Laderas de Costa Rica. Cartago: Editorial Tecnológica.

ACG. 2009. Código de Cimentaciones de Costa Rica. Cartago: Editorial Tecnológica.

Colegio Federado de Ingenieros y de Arquitectos de Costa Rica (CFIA). 2014. Código Sísmico de Costa Rica. Cartago: Editorial Tecnológica.

Environmental and Water Resources Institute. (2009). *Curve Number Hydrology State of the Practice*. (R. Hawkins, T. Ward, D. Woodward, & J. Van Mullen, Eds.) Estados Unidos: American Society of Civil Engineers.

HEC-18. (2012). *HEC-18*. US Department of Transportation, Federal Highway Administration.

Kumar, S., & Singh, V. (2003). *Soil Conservation Service Curve Number (SCS-CN) Methodology*. Water Science and Technology Library, Springer Netherlands.

Ministerio de Agricultura y Ganadería. (1991). *Manual descriptivo de la leyenda del Mapa de capacidad de uso de la tierra de Costa Rica Escala 1:200.000*. Secretaría Ejecutiva de Planificación Sectorial Agropecuaria.

Mishra, S., Chaudhary, A., Shrestha, R., Pandey, A., & Lal, M. (2014). Experimental Verification of the Effect of Slope and Land. *Water Resour Manage*, 3407-3416.

Natural Resources Conservation Service. (2009). *Chapter 15: Time of Concentration*. National Engineering Handbook: Part 630-Hydrology, United States Department of Agriculture.

Natural Resources Conservation Service. (2010). *Part 630 Hydrology National Engineering Handbook*. Chapter 15: Time of concentration, United States Department of Agriculture.

Oregon Department of Transportation Highway Division. (2005). *Hydraulics Manual*. Oregon.

Rosgen, D. (1994). *Applied River Morphology* (Segunda ed.). Lakewood, Colorado, Estados Unidos: Wildland Hydrology.

Vahrson, W.-G., & Dercksen, P. (1990). Intensidades críticas de lluvia para el diseño de obras de conservación de suelos en Costa Rica. *Agronomía Costarricense*, 14(2), 141-150.

## **9. Anexos**

Anexo A. Anexos del informe geotécnico para el diseño del cabezal de desfogue y la protección de talud

| INTERVALO (m)  |      | M  | Prof. (cm) |    |    | N  | N SPT |    |    |    |    | w (%) | LL | IP | PAS 200 | SUCS | DESCRIPCIÓN VISUAL DEL SUELO   |  |
|--|------|----|------------|----|----|----|-------|----|----|----|----|-------|----|----|---------|------|--|--|
|  |      |    | 15         | 30 | 45 |    | 0     | 20 | 40 | 60 | 80 |       |    |    |         |      |  |  |
| 0.00   | 0.45 | 1  | 2          | 1  | 2  | 3  | N=3   |    |    |    |    |       |    |    |         |      |  |  |
| 0.45   | 0.90 | 2  | 2          | 2  | 2  | 4  | N=4   |    |    |    |    |       |    |    |         |      |  |  |
| 0.90   | 1.35 | 3  | 3          | 2  | 6  | 8  | N=6   |    |    |    |    | 23.6  |    |    |         |      | Limo arcilloso. Color café oscuro. Presenta bloques de escombros (relleno). Plasticidad media. |  |
| 1.35   | 1.80 | 4  | 5          | 4  | 4  | 8  | N=6   |    |    |    |    |       |    |    |         |      |  |  |
| 1.80   | 2.25 | 5  | 3          | 2  | 1  | 3  | N=3   |    |    |    |    |       | 51 | 20 |         | MH   |  |  |
| 2.25   | 2.70 | 6  | 1          | 0  | 1  | 1  | N=1   |    |    |    |    |       |    |    |         |      |  |  |
| 2.70   | 3.15 | 7  | 1          | 0  | 2  | 2  | N=2   |    |    |    |    | 22.1  |    |    |         |      |  |  |
| 3.15   | 3.60 | 8  | 2          | 1  | 1  | 2  | N=2   |    |    |    |    |       |    |    |         |      | Limo arenoso arcilloso. Color gris oscuro. Presenta olor orgánico. Plasticidad media a baja.   |  |
| 3.60   | 4.05 | 9  | 1          | 1  | 1  | 2  | N=2   |    |    |    |    |       |    |    |         |      |  |  |
| 4.05   | 4.50 | 10 | 3          | 3  | 4  | 7  | N=7   |    |    |    |    |       |    |    |         |      |  |  |
| 4.50   | 4.95 | 11 | 3          | 3  | 1  | 4  | N=4   |    |    |    |    | 30.1  |    |    |         |      | Arena limosa. Color gris oscuro. Presenta bloques de hasta 12.5 mm.                            |  |
| 4.95   | 5.40 | 12 | 1          | 2  | 2  | 4  | N=4   |    |    |    |    |       |    |    |         |      |  |  |
| 5.40   | 5.85 | 13 | 2          | 2  | 2  | 4  | N=4   |    |    |    |    |       |    |    | 58.1    |      |  |  |
| 5.85   | 6.30 | 14 | 2          | 10 | 12 | 22 | N=22  |    |    |    |    |       |    |    |         |      | Limo arenoso. Color café amarillento. No plástico.   |  |
| 6.30   | 6.75 | 15 | 30         | 60 |    | 60 | N=60  |    |    |    |    |       |    |    | 53.8    |      |  |  |
| N.F. = 2.90  |      |    |            |    |    |    |       |    |    |    |    |       |    |    |         |      |  |  |
| <b>Simbología:</b>   |      |    |            |    |    |    |       |    |    |    |    |       |    |    |         |      |  |  |
| N: Valor N de SPT NF: Nivel freático M = Identificación de muestra |      |    |            |    |    |    |       |    |    |    |    |       |    |    |         |      |  |  |



PT-06-R-01 V1



**Informe de resultados de ensayos de laboratorio  
Caracterización de Suelos**



Informe Número: IR 05-154-2023

San José, 20 de Febrero del 2023.

Proyecto: Quebrada Rodriguez - Santa Ana

Cliente: Grupo Gavia  
Ingeniero(a): Danilo Jiménez  
Cargo: Ingeniero

Estimado Ingeniero(a):

Me permito presentar de acuerdo a lo solicitado los resultados de los ensayos realizados a materiales de suelos.

|                                       |                |
|---------------------------------------|----------------|
| Número de muestra                     | 29-013-23      |
| Lugar de muestreo:                    | No indica      |
| Condiciones ambientales del muestreo: | No indica      |
| El laboratorio realizó el muestreo:   | Aportada       |
| Descripción:                          | Sondeos        |
| Lugar de realización del ensayo:      | Laboratorio 01 |
| Condición de la muestra:              | Buena          |
| Fecha de muestreo:                    | N/A            |
| Fecha de recepción de la muestra:     | 2023-02-15     |
| Fecha de realización del ensayo:      | 2023-02-18     |
| Desviaciones aplicadas:               | Ninguna        |
| Observaciones:                        | Ninguna        |

Aprobado por:

Ing. José Andrés Gamboa G.  
Gerente Técnico IGSA

Revisado y elaborado por:

Alonso Cruz González  
Jefe de Laboratorio IGSA

PT-06-R-01 V1



**Informe de resultados de ensayos de laboratorio  
Caracterización de Suelos**



Informe Número: IR 05-154-2023

**Resultados obtenidos**

| Quebrada Rodriguez - Santa Ana |             |                   |
|--------------------------------|-------------|-------------------|
| Muestra                        | Perforación | Contenido Humedad |
| #3                             | #1          | 23,6%             |
| #6                             | #1          | 22,1%             |
| #9                             | #1          | 30,1%             |

PT-06-R-01 V1



**Informe de resultados de ensayos de laboratorio**  
**Caracterización de Suelos**



Informe Número: IR 05-154-2023

**Ensayos realizados:**

**Acreditado**

Contenido de humedad de suelos AASHTO T265

\*

**Notas**

**Nota 1:** El informe presente NO puede ser reproducido en forma parcial, únicamente en forma total y con la aprobación del Gerente General de IGSA.

**Nota 2:** Los resultados reportados corresponden únicamente a los ítems ensayados.

**Nota 3:** La incertidumbre de los resultados se expresa a un 95 % de confianza.

**Nota 4:** La incertidumbre se calcula según lo establecido en el instructivo "Estimación de la Incertidumbre" (I-51) y se reporta en el formulario "Incertidumbre" (I-51-R-01).

**Nota 5:** Los ensayos identificados en este documento con un asterisco (\*) al lado del nombre del ensayo, son todos aquellos que estén "Acreditados", y con dos asteriscos (\*\*) al lado del nombre del ensayo son todos aquellos que no estén acreditados. El símbolo de acreditación se utilizará en este registro únicamente si se incluyen resultados de ensayos dentro del alcance de la acreditación de nuestro laboratorio. Si desea conocer el alcance del laboratorio puede visitar el sitio web del ECA [www.eca.or.cr](http://www.eca.or.cr)

**Nota 6:** El símbolo de acreditación se utilizará en este registro únicamente si se incluyen resultados de ensayos dentro del alcance de la acreditación de nuestro laboratorio.

**Nota 7:** Las incertidumbres al 95 % de confianza de los resultados emitidos son custodiadas por el Laboratorio IGSA, en caso de ser necesarias se le podrán solicitar en cualquier momento al Gerente Técnico.

San Vicente de Moravia

[ingenieria@ingenieriaqambo.com](mailto:ingenieria@ingenieriaqambo.com)

Teléfono de Oficina: (506) 4034 3846

Página 3 de 3