

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**



**TESIS**

**ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DE TECHOS VERDES EN LA  
ESCORRENTÍA DEL DRENAJE PLUVIAL DE UNA CIUDAD  
ALTOANDINA - AYACUCHO**

**PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO CIVIL**

**ELABORADO POR**

**JAMIL ARONE VELASQUEZ  
ID:0000-0002-0741-0999**

**ASESORA**

**Dra. ADA LIZ ARANCIBIA SAMANIEGO  
ID:0000-0002-1637-8230**

**LIMA- PERÚ**

**2024**

© 2024, Universidad Nacional de Ingeniería. Todos los derechos reservados

**“El autor autoriza a la UNI a reproducir la tesis en su totalidad o en parte, con fines estrictamente académicos.”**

Arone Velasquez, Jamil

jamil.arone.v@uni.pe

941522315

## AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi profundo agradecimiento a todas las personas que han contribuido de manera significativa a la realización de esta tesis, "Análisis de la influencia de Techos Verdes en la esorrentía del drenaje pluvial de una ciudad altoandina - Ayacucho". Su apoyo incondicional y colaboración han sido fundamentales en el éxito de este proyecto de investigación.

En primer lugar, quiero agradecer a mis padres, quienes han sido mi fuente constante de inspiración y apoyo a lo largo de mi carrera. Su dedicación, paciencia y amor incondicional han sido el motor que impulsa mis logros. A mis hermanas y enamorada, por sus alientos constantes y motivación.

Agradezco especialmente a la Dra. Ing. Ada Liz Arancibia Samaniego, mi asesora de tesis, por su guía experta, paciencia y dedicación. Su conocimiento en el campo de la ingeniería civil ha sido invaluable, y su orientación ha sido crucial para el desarrollo y éxito de este estudio. Así mismo, al Dr. Ing. Julio Kuroiwa Zevallos por las valiosas recomendaciones y colaboración durante el desarrollo de la presente investigación.

Asimismo, quiero expresar mi agradecimiento al Instituto de Investigación de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Ingeniería (IIFIC) por el respaldo financiero brindado en el marco del proyecto de investigación PI-IC-2022-001198. Su apoyo fue esencial para la culminación de la investigación.

Agradezco a la Universidad Nacional de Ingeniería, donde tuve el privilegio de cursar mi carrera universitaria. Agradezco a la institución por proporcionar el ambiente académico propicio para el desarrollo de este estudio y por inculcar en mí los principios de la ingeniería civil.

Asimismo, quiero expresar mi gratitud al Laboratorio Nacional de Hidráulica, donde se llevó a cabo una parte importante de la investigación. La infraestructura y recursos proporcionados por el laboratorio fueron esenciales para la recopilación y análisis de datos, contribuyendo significativamente la investigación.

Por último, agradezco a mis compañeros de estudio y a aquellos que brindaron su apoyo durante el transcurso de este estudio. Su colaboración fue esencial para superar los desafíos y obstáculos que surgieron durante este proceso.

Este trabajo no hubiera sido posible sin la contribución y apoyo de cada una de estas personas. A todos ustedes, mi más sincero agradecimiento.

## ÍNDICE

<b>Resumen .....</b>	<b>6</b>
<b>Abstract .....</b>	<b>7</b>
<b>Prólogo .....</b>	<b>8</b>
<b>Lista de tablas .....</b>	<b>10</b>
<b>Lista de figuras .....</b>	<b>12</b>
<b>Lista de símbolos y siglas .....</b>	<b>15</b>
<b>Capítulo I: Introducción .....</b>	<b>17</b>
1.1. Generalidades .....	17
1.2. Descripción del problema de investigación .....	19
1.2.1. Formulación del Problema.....	20
1.3. Objetivos.....	20
1.3.1. Objetivo General.....	20
1.3.2. Objetivos Específicos .....	20
1.4. Hipótesis.....	21
1.5. Metodología.....	21
1.6. Antecedentes investigativos .....	22
1.6.1. Antecedentes Nacionales.....	23
1.6.2. Antecedentes Internacionales .....	25
<b>Capítulo II: Marco teórico y conceptual .....</b>	<b>29</b>
2.1. Hidrología aplicada.....	29
2.1.1. Estadística hidrológica.....	29
2.1.2. Periodo de retorno.....	37
2.1.3. Tormentas de diseño.....	37
2.1.4. Curvas intensidad duración frecuencia (IDF) .....	37
2.1.5. Hietograma de diseño .....	39
2.1.6. Infiltración .....	39
2.1.7. Método SCS número de curva (CN).....	40

2.2.	Drenaje pluvial urbano.....	43
2.2.1.	Hidrología urbana .....	43
2.2.2.	Estudio de flujo en calles .....	45
2.3.	Techos verdes .....	47
2.3.1.	Definición.....	47
2.3.2.	Beneficios .....	47
2.3.3.	Tipos .....	48
2.3.4.	Componentes de los techos verdes extensivos .....	49
2.3.5.	Consideraciones de diseño .....	52
2.4.	Simulación de lluvias .....	53
2.4.1.	Definición.....	53
2.4.2.	Antecedentes.....	53
2.4.3.	Importancia.....	53
2.4.4.	Tipos de simuladores de lluvia .....	53
2.4.5.	Características y requerimientos importantes .....	54
2.4.6.	Diseño y requerimientos.....	55
2.4.7.	Sensores de Flujo.....	56
2.5.	Modelamiento en HEC-RAS.....	57
2.5.1.	Simulación numérica .....	57
2.5.2.	Modelo HEC-RAS 2D .....	57
<b>Capítulo III: Caracterización de la zona de estudio.....</b>		<b>60</b>
3.1.	Descripción general de la zona de estudio.....	60
3.2.	Caracterización climática.....	62
3.3.	Caracterización física .....	63
3.3.1.	Información topográfica .....	63
3.3.2.	Uso de suelo.....	64
3.3.3.	Descripción de las viviendas, techos y jardines .....	65
3.3.4.	Calles y avenidas .....	66

3.3.5. Drenaje pluvial urbano.....	67
<b>Capítulo IV: Determinación de tormentas de diseño .....</b>	<b>68</b>
4.1. Recopilación de información .....	68
4.2. Completación de información faltante .....	69
4.3. Registro de precipitación máxima por año .....	70
4.4. Análisis de datos dudosos.....	71
4.5. Pruebas de bondad de ajuste.....	73
4.5.1. Prueba de Chi-Cuadrado.....	73
4.5.2. Prueba de Kolmogorov-Smirnov .....	74
4.6. Determinación de curvas IDF .....	75
<b>Capítulo V: Diseño y ensayo del simulador de lluvias .....</b>	<b>80</b>
5.1. Descripción del área de trabajo.....	80
5.1.1. Laboratorio Nacional de Hidráulica .....	80
5.2. Descripción del simulador de lluvias .....	81
5.3. Soporte estructural .....	81
5.3.1. Subestructura .....	82
5.3.2. Superestructura .....	83
5.3.3. Sistema de elevación .....	83
5.4. Techos experimentales .....	84
5.4.1. Techo Verde (TV).....	84
5.4.2. Techo Convencional (TC).....	91
5.4.3. Desagüe .....	94
5.5. Sistema de aspersión de lluvias .....	95
5.5.1. Boquillas de aspersión .....	95
5.5.2. Tuberías .....	96
5.5.3. Bomba de succión .....	97
5.5.4. Accesorios .....	98
5.6. Sistema de lectura de datos .....	99

5.6.1. Sensores de flujo.....	99
5.6.2. Código de arduino .....	101
5.7. Calibración y operación del simulador de lluvias.....	101
5.7.1. Calibración del simulador de lluvia .....	101
5.8. Ensayos realizados y recopilacion de datos.....	104
<b>Capítulo VI: Modelamiento del drenaje en HEC-RAS 2D .....</b>	<b>106</b>
6.1. Delimitación del área de estudio .....	106
6.2. Configuración del terreno .....	107
6.3. Configuración de la malla computacional .....	108
6.3.1. Generación de la mallada computacional .....	108
6.4. Condiciones de borde.....	114
6.4.1. Precipitación .....	114
6.4.2. Hidrogramas de flujo .....	116
6.4.3. Pendiente de fondo .....	118
6.5. Calibración del modelo .....	119
6.6. Procesamiento.....	122
6.7. Simulación de escenarios.....	122
<b>Capítulo VII: Discusión de resultados .....</b>	<b>124</b>
7.1. Resultados de calibración de simulador de lluvias .....	124
7.1.1. Intensidad de precipitación .....	124
7.1.2. Distribución de uniformidad .....	126
7.1.3. Tamaño de gotas.....	129
7.2. Resultados de ensayos del modelo experimental .....	130
7.2.1. Hidrogramas experimentales.....	130
7.3. Resultados del modelamiento en HEC-RAS 2D .....	133
7.3.1. Resultados de simulación.....	134
<b>Conclusiones.....</b>	<b>142</b>
<b>Recomendaciones.....</b>	<b>145</b>

<b>Referencias bibliográficas.....</b>	<b>146</b>
<b>Anexos .....</b>	<b>152</b>

## RESUMEN

En los últimos años el rápido crecimiento urbano ha provocado un incremento de superficies impermeables que reducen de manera significativa la infiltración, retención, transpiración y evapotranspiración del agua. Las superficies impermeables incrementaron el volumen de escorrentía que discurre sobre la superficie urbana, disminuyendo el tiempo de concentración e incrementando el caudal pico de descarga; generando problemas en el sistema de drenaje pluvial. En el Perú, además de lo expuesto, los procesos de urbanización se están dando con una evidente falta de planificación territorial, pues estas no consideran infraestructuras de drenaje pluvial; por ejemplo, el 98.32 % de las áreas urbanas en Ayacucho no tienen drenaje pluvial, como ocurre en el centro poblado San Pedro de Larcaj, la ciudad altoandina de estudio.

A nivel mundial, se han planteado y puesto en práctica sistemas urbanos de drenaje sostenible que permiten mitigar los efectos generados por la impermeabilización de las zonas urbanas, entre ellas destacan los techos verdes. La presente investigación tiene como objetivo analizar la influencia de los techos verdes en la escorrentía del drenaje pluvial de una ciudad altoandina en Ayacucho.

El estudio consistió en la determinación del hidrograma de respuesta a tormentas de intensidades de precipitaciones para periodos de retorno de 2, 5 y 10 años, correspondientes a la ciudad altoandina en estudio. La simulación de lluvia proporcionó información sobre el comportamiento hidrológico e hidráulico de los techos, en específico hidrogramas de salida de cada tipo de techo. Finalmente, se realizó un modelamiento hidráulico e hidrológico del drenaje pluvial a nivel de la cuenca urbana con el programa HEC-RAS 2D, considerando los hidrogramas de salida experimentales de cada tipo de techo, escalados en proporción al área de los techos de las viviendas de la ciudad altoandina.

Los resultados de la simulación de lluvia en los techos experimentales indican que los techos verdes reducen del caudal pico hasta en un 53 %, retardan el caudal pico en 10.3 minutos y retienen el volumen hasta en un 68 % respecto a los techos convencionales. Mientras que en la simulación con HEC-RAS 2D, los hidrogramas en la salida de la cuenca urbana demuestran que la implementación de techos verdes genera una reducción del caudal pico de hasta 31 %, un tiempo de retardo del caudal pico de 1.17 minutos y una retención del volumen de hasta 23 % respecto a la simulación en el que se implementó techos convencionales.

## ABSTRACT

In recent years, rapid urban growth has caused an increase in impermeable surfaces that significantly reduce water infiltration, retention, transpiration and evapotranspiration. The impermeable surfaces increased the volume of runoff that runs over the urban surface, decreasing the concentration time and increasing the peak discharge flow, generating problems in the storm drainage system. In Peru, in addition to the above, the urbanization process is occurring with an evident lack of territorial planning, since these do not consider storm drainage infrastructure; For example, 98.32 % of the urban areas in Ayacucho do not have storm drainage, as occurs in the San Pedro de Larcaay population center, the high Andean city of study.

At a global level, sustainable urban drainage systems have been proposed and implemented that allow mitigating the effects generated by the waterproofing of urban areas, among them green roofs stand out. The objective of this research is to analyze the influence of green roofs on the storm drainage runoff of a high Andean city in Ayacucho.

The study consisted of determining the storm response hydrograph of precipitation intensities for return periods of 2, 5 and 10 years, corresponding to the high Andean city under study. The rainfall simulation provided information on the hydrological and hydraulic behavior of the roofs, specifically output hydrographs of each type of roof. Finally, hydraulic and hydrological modeling of storm drainage at the urban basin level was carried out with the HEC-RAS 2D program, considering the experimental output hydrographs of each type of roof, scaled in proportion to the area of the roofs of the houses of the high Andean city.

The results of the simulation of rainfall on the experimental roofs indicate that green roofs reduce the peak flow by up to 53 %, delay the peak flow by 10.3 minutes and retain the volume by up to 68 % compared to conventional roofs. While in the simulation with HEC-RAS 2D, the hydrographs at the outlet of the urban basin demonstrate that the implementation of green roofs generates a reduction in peak flow of up to 31 %, a peak flow delay time of 1.17 minutes and a volume retention of up to 23 % compared to the simulation in which conventional ceilings were implemented.

## PRÓLOGO

De acuerdo con los indicadores de brecha en infraestructura de drenaje urbano publicados por el Ministerio de Economía y Finanzas en el Perú, más del 90 % del territorio nacional no cuenta con un sistema adecuado de drenaje pluvial. Los poblados altoandinos del país, donde llueve con más frecuencia, en su mayoría están dentro de este 90 %, como es el caso del centro poblado San Pedro de Larcay, ubicado en Ayacucho. En los últimos años se está promoviendo el uso de sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS), que buscan reducir el flujo superficial producido por la lluvia, vía ralentización de este ya sea con retención o infiltración, además de tomar en cuenta el control de contaminantes, la biodiversidad y comodidad. Los techos verdes inicialmente investigados por su capacidad de proporcionar confort térmico a la vivienda están siendo analizados como parte de los SUDS. Existen reportes de investigaciones en gabinete del impacto de los techos verdes en la reducción del pico del hidrograma de respuesta a una tormenta.

El presente trabajo analiza el impacto que tendría la implementación de techos verdes en el poblado de San Pedro de Larcay en el control del flujo de escorrentía. Para esto se realizó el análisis del fenómeno de precipitación – escorrentía en condiciones controladas en un modelo a escala reducida, midiendo la precipitación sobre los techos y la salida de flujo (escorrentía) de los techos. Se construyó un modelo de techo típico de cobertura metálica (calaminas) y de techo verde, además se mejoró el simulador de lluvia del Laboratorio Nacional de Hidráulica para representar las condiciones de una lluvia natural de la zona de estudio.

Luego de conocer la respuesta de los techos convencionales y techos verdes en laboratorio, se escalaron los hidrogramas de respuesta al área de estudio para un análisis en gabinete del impacto a nivel del poblado.

Se realizaron simulaciones de tormentas con intensidades constantes de 59.4 mm/h, 67.6 mm/h y 74.6 mm/h, sobre los techos (convencional y verde), para diferentes pendientes de los techos. Luego de comparar los hidrogramas de respuesta se pudo determinar la reducción del pico en 53 %, retardo del caudal pico en 10.3 minutos y retención del volumen hasta en un 68 %. Luego del escalamiento, se determinó el impacto de los techos verdes a nivel del poblado con una reducción del caudal pico de hasta 31 %, un tiempo de retardo del caudal

pico de 1.17 minutos y una retención del volumen de hasta 23 % en comparación de la situación con techos convencionales.

El gran aporte del presenta trabajo, además de las mejoras del simulador de lluvia, es el análisis de la respuesta del hidrograma de salida de un techo verde, para las condiciones similares de tormenta de una ciudad altoandina del país. Es importante resaltar este aspecto, pues no existe evidencia de estudios similares en nuestro país.

Asesora

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Valores de $\mu y$ y $\sigma y$ para la distribución Gumbel. ....	31
Tabla 2: Valores de K para coeficientes de asimetría positivos .....	32
Tabla 3: Valores de K para coeficientes de asimetría negativos .....	32
Tabla 4: Distribución de Chi-cuadrado $X^2$ .....	35
Tabla 5: Valores de $\Delta t$ , para valores de N y niveles de significación $\alpha$ .....	36
Tabla 6: Condiciones antecedentes de humedad en función de la lluvia .....	41
Tabla 7: Grupo Hidrológico del suelo según el SCS .....	42
Tabla 8: CN para cada uso de la tierra en condición de Tipo II .....	42
Tabla 9: Características de los tipos de techos verdes .....	49
Tabla 10. Uso de suelo de la cuenca urbana.....	65
Tabla 11. Material de techo de viviendas de cuenca urbana .....	65
Tabla 12: Precipitaciones máximas en 24 horas (mm) .....	68
Tabla 13: Precipitaciones máximas mensuales en 24 horas (mm) .....	69
Tabla 14: Precipitaciones máximas anuales en 24 horas (mm).....	71
Tabla 15: Valores estimados de $Xc2$ .....	73
Tabla 16: Valores estimados de $\Delta c$ .....	74
Tabla 17: Precipitaciones en (mm), para distintas duraciones.....	75
Tabla 18: Intensidades en (mm/h), para distintas duraciones.....	76
Tabla 19: Intensidades en (mm/h) para distintos periodos de retorno .....	77
Tabla 20: Intensidades, frecuencias y duraciones con logaritmos .....	78
Tabla 21: Características de los tipos de techos verdes extensivos.....	85
Tabla 22: Criterios para la selección de plantas. ....	86
Tabla 23: Valores de referencia de escorrentía. ....	89
Tabla 24: Tormentas de diseño a ser recreadas en (mm/h) .....	95
Tabla 25. Materiales usados en el sistema de aspersion .....	99
Tabla 26: Factores de conversión K para sensores de flujo .....	100
Tabla 27: Clasificación de la lluvia en función del diámetro de las gotas. ....	103
Tabla 28: Escenarios de ensayos para TV y TC .....	105
Tabla 29: Coeficientes de Maning y porcentajes de impermeabilidad .....	110
Tabla 30: Coeficientes de Maning y porcentajes de impermeabilidad .....	111
Tabla 31: Valores de Número de Curva CN (III) .....	113
Tabla 32: Precipitaciones de entrada para el modelamiento hidráulico.....	116
Tabla 33: Precipitaciones máximas para distintas duraciones.....	120
Tabla 34: Parámetros calibrados del modelo.....	122

Tabla 35: Escenarios de modelamiento hidráulico.....	123
Tabla 36: Intensidades en función de giro de cierre de válvula .....	124
Tabla 37: Error relativo entre tormentas de diseño y experimentales .....	126
Tabla 38: Coeficiente de Uniformidad ( $C_u$ ).....	128
Tabla 39: Diámetro de promedio de gotas de lluvia.....	130
Tabla 40: Reducción del caudal pico .....	132
Tabla 41: Tiempo de retardo del caudal pico .....	132
Tabla 42: Reducción del volumen total .....	133
Tabla 43: Reducción del caudal pico .....	139
Tabla 44: Tiempo de retardo del caudal pico .....	139
Tabla 45: Reducción del volumen total .....	140

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Porcentaje de áreas urbanas sin servicio de drenaje pluvial. ....	19
Figura 2: Metodología de Investigación .....	21
Figura 3: Método de los bloques alternos .....	39
Figura 4: Variables de método de atracción de precipitaciones del SCS .....	40
Figura 5: Escurrimiento de aguas pluviales en cuencas naturales y urbana. ....	44
Figura 6: Efectos del desarrollo urbano en la transformación lluvia-escorrentía. ....	45
Figura 7: Aproximaciones de solución a las Ecuaciones de Saint-Venant. ....	46
Figura 8: Componentes de los techos verdes extensivos. ....	50
Figura 9: Sensor de Flujo. ....	56
Figura 10: Mapa de ubicación del departamento Ayacucho. ....	60
Figura 11: Mapa de ubicación de la provincia Sucre. ....	61
Figura 12: Regiones naturales del Perú. ....	62
Figura 13: Centro poblado San Pedro de Larcay. ....	62
Figura 14: Precipitaciones promedio mensual (Estación Paucaray). ....	63
Figura 15: DEM y ortofoto con límite de cuenca urbana .....	64
Figura 16: Vivienda típica de cuenca urbana, San Pedro de Larcay. ....	66
Figura 17: Calle principal de San Pedro de Larcay después de tormenta. ....	66
Figura 18: Cuneta de San Pedro de Larcay después de tormenta. ....	67
Figura 19: Calle de San Pedro de Larcay después de tormenta. ....	67
Figura 20: Precipitaciones máximas en 24 horas .....	71
Figura 21: Análisis de datos dudosos .....	72
Figura 22: Curvas IDF. ....	79
Figura 23: Laboratorio Nacional de Hidráulica. ....	80
Figura 24: Modelo de simulador de lluvia del LNH. ....	80
Figura 25: Elementos del modelo experimental. ....	81
Figura 26: Soporte estructural del modelo experimental. ....	82
Figura 27: Componentes de techos verdes extensivos (Vijayaraghavan, 2016) ....	86
Figura 28: Capa de vegetación, Planta suculenta Aptenia Cordifolia .....	87
Figura 29: Espesor de sustrato en función de tipo de vegetación .....	88
Figura 30: Sustrato de crecimiento de techo verde extensivo. ....	89
Figura 31: Capa de drenaje y filtro, Geodren Planar. ....	90
Figura 32: Componentes del Geodren Planar. ....	91
Figura 33: Capa impermeable anti-raíces, Geomembrana HDPE de 1 mm. ....	91
Figura 34: Componentes del Techo Convencional. ....	92

Figura 35: Configuración de Techo Convencional, dimensiones en metros .....	92
Figura 36: Techo de Calamina galvanizada.....	93
Figura 37: Vigas de madera .....	93
Figura 38: Capa impermeable, Membrana de HDPE de 1 mm.....	94
Figura 39: Canaletas de desagües .....	94
Figura 40: Boquillas de aspersión FullJet ¼ HH-14WSQ .....	96
Figura 41: Distribución de boquillas de aspersión.....	96
Figura 42: Esquema del sistema de aspersión .....	97
Figura 43: Bomba de succión.....	98
Figura 44: Válvula de compuerta .....	98
Figura 45: Sensor de flujo de 1/2" .....	100
Figura 46: Placa de desarrollo ESP32 y código Arduino .....	101
Figura 47: Configuración de plataforma para calibrar la intensidad.....	102
Figura 48: Distribución de recipientes para determinar el Cu .....	103
Figura 49: Gránulos de harina formados luego de precipitación.....	104
Figura 50: Límite del área de estudio.....	106
Figura 51: Modificaciones del terreno .....	108
Figura 52: Mallado computacional. ....	109
Figura 53: Mapa de Coeficiente de Manning .....	112
Figura 54: Mapa de Números de Curva .....	114
Figura 55: Hietogramas de diseño. ....	115
Figura 56: Condiciones de borde para cada techo de viviendas .....	117
Figura 57: Hidrogramas escalados para viviendas con techo convencional....	117
Figura 58: Hidrogramas escalados para viviendas con techo verde.....	118
Figura 59: Condiciones de borde, salidas .....	119
Figura 60: Huella hídrica aguas debajo de alcantarilla de referencia .....	120
Figura 61: Tirantes de calibración en la alcantarilla de referencia .....	121
Figura 62: Intensidades en función de giro de válvula de compuerta .....	125
Figura 63: Distribución de precipitación para la intensidad 74.6 mm/h.....	126
Figura 64: Distribución de precipitación para la intensidad 67.6 mm/h.....	127
Figura 65: Distribución de precipitación para la intensidad 59.4 mm/h.....	128
Figura 66: Distribución de diámetro de gránulos de harina.....	129
Figura 67: Distribución de diámetro de gránulos de harina.....	129
Figura 68: Hidrogramas de TC y TV para intensidad de 74.6 mm/h.....	130
Figura 69: Hidrogramas de TC y TV para intensidad de 67.6 mm/h.....	131

Figura 70: Hidrogramas de TC y TV para intensidad de 59.4 mm/h .....	131
Figura 71: Sección para el análisis de hidrogramas de la cuenca urbana .....	134
Figura 72: Sección de análisis de hidrogramas de esorrentía .....	135
Figura 73: Hidrograma para Periodo de Retorno 10 años y Pendiente 10 % ...	135
Figura 74: Hidrograma para Periodo de Retorno 10 años y Pendiente 15 % ...	136
Figura 75: Hidrograma para Periodo de Retorno 10 años y Pendiente 20 % ...	136
Figura 76: Hidrograma para Periodo de Retorno 5 años y Pendiente 10 % .....	136
Figura 77: Hidrograma para Periodo de Retorno 5 años y Pendiente 15 % .....	137
Figura 78: Hidrograma para Periodo de Retorno 5 años y Pendiente 20 % .....	137
Figura 79: Hidrograma para Periodo de Retorno 2 años y Pendiente 10 % .....	137
Figura 80: Hidrograma para Periodo de Retorno 2 años y Pendiente 15 % .....	138
Figura 81: Hidrograma para Periodo de Retorno 2 años y Pendiente 15 % .....	138
Figura 82: Influencia de techo verde en la reducción de esorrentía pluvial ....	140

## LISTA DE SÍMBOLOS Y SIGLAS

<b>ANA</b>	: Autoridad Nacional del Agua
<b>ASTM</b>	: American Society for Testing and Materials
<b>CN</b>	: Número de Curva
<b>DEM</b>	: Digital Elevation Model
<b>DTM</b>	: Digital Terrain Model
<b>DWE</b>	: Diffusion Wave Equations
<b>FLL</b>	: Landscape Development and Landscaping Research Society
<b>FAO</b>	: Food and Agriculture Organisation
<b>GIS</b>	: Geographic Information System
<b>HDPE</b>	: High Density Polyethylene
<b>HEC-RAS 2D</b>	: Hydrologic Engineering Center - River Analysis System 2D
<b>IDF</b>	: Intensidad Duración Frecuencia
<b>IGRA</b>	: International Green Roof Association
<b>INEI</b>	: Instituto Nacional de Estadística e Informática
<b>ISI</b>	: Institute for Scientific Information
<b>LNH</b>	: Laboratorio Nacional de Hidráulica
<b>MEF</b>	: Ministerio de Economía y Finanzas
<b>MTC</b>	: Ministerio de Transportes y Comunicaciones
<b>MVCS</b>	: Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento
<b>NTE</b>	: Norma Técnica de Edificación
<b>PROMPERU</b>	: Comisión de Promoción del Perú para la Exportación y el Turismo
<b>PVC</b>	: Polyvinyl Chloride
<b>RNE</b>	: Reglamento Nacional de Edificaciones
<b>SCS</b>	: Soil Conservation Service
<b>SENAMHI</b>	: Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología
<b>SUDS</b>	: Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible

<b>SWE</b>	: Shallow Water Equations
<b>TC</b>	: Techo Convencional
<b>TIFF</b>	: Tag Image File Format
<b>TIN</b>	: Triangular Irregular Networks
<b>TV</b>	: Techo Verde
<b>UNESCO</b>	: United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization
<b>UTM</b>	: Universal Transverse Mercator
<b>WGS</b>	: World Geodetic System

## CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

### 1.1. GENERALIDADES

El rápido crecimiento poblacional y urbano de los últimos años ha ocasionado un incremento en las superficies impermeables, generando alteraciones en el ciclo hidrológico y dificultades en el drenaje pluvial urbano, especialmente grandes urbes. El incremento de estas superficies impermeables afecta la infiltración, detención, transpiración y evaporación del agua (Amagua & Huayracocha, 2021) disminuyendo la capacidad natural de gestión del agua. Este fenómeno genera un incremento del volumen de agua que discurre por la superficie urbana, causando inundaciones y erosión de calles, siendo este uno de los efectos más significativos en el desarrollo urbano (Trapote, 2016).

Diversas alternativas se han propuesto como soluciones a esta problemática, conocidos como Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS); de estos sistemas destacan los Techos Verdes (TV), debido a las diversas ventajas que ofrecen en comparación con otras opciones.

Los Techos Verdes juegan o tienen un papel importante en la prevención de inundaciones al retener entre el 50 % y el 90 % de la lluvia que cae sobre ellos, devolviéndola al ciclo del agua mediante el proceso de evaporación y evapotranspiración. El exceso de agua se filtra y se drena con un retraso temporal, reduciendo así la carga en los sistemas de alcantarillado especialmente durante los períodos de flujo máximo (International Green Roof Association [IGRA], 2018).

En el Perú se viene evidenciando los cambios que genera el incremento de superficies impermeables, sobre todo en las urbes ubicadas en las regiones de la selva, sierra y el norte del Perú; regiones que se caracterizan por presentar precipitaciones intensas y que no cuentan con un adecuado drenaje pluvial urbano. Si bien se puede implementar un sistema de drenaje pluvial convencional, este al no haber sido considerado en el planeamiento urbano, su construcción en una urbe ya establecida ocasionaría incomodidad y consecuencias negativas para la población. Caso que ocurre en la ciudad altoandina San Pedro de Larcay ubicada en el departamento de Ayacucho, que se caracteriza por lluvias intensas y carencia de un sistema de drenaje pluvial adecuado.

Ante esta problemática, esta investigación tiene como objetivo analizar la influencia de los Techos Verdes en la escorrentía del drenaje pluvial de la ciudad altoandina ubicada en Ayacucho.

El trabajo de investigación está estructurado de la siguiente manera:

Capítulo 1: Contiene la descripción del problema de investigación, los objetivos, la hipótesis, la metodología y los antecedentes investigativos.

Capítulo 2: Proporciona información del marco teórico y conceptual, en el marco teórico se presenta la búsqueda de información relacionada con el presente trabajo; en el marco conceptual se presenta los principales conceptos relacionados con las variables de la investigación.

Capítulo 3: Corresponde a la descripción general de la zona de estudio de estudio, en específico se presentan las características climáticas y físicas de la cuenca urbana de estudio.

Capítulo 4: Proporciona la determinación de tormentas de diseño; donde mediante un estudio hidrológico se obtienen las curvas IDF, de las cuales se identifican las intensidades de precipitación para periodos de retorno de 2, 5 y 10 años.

Capítulo 5: Corresponde al diseño y ensayo de un simulador de lluvias; donde se describe el área de trabajo, los componentes principales del Techo Verde, la calibración y operación del simulador de lluvias. Además, se detalla los escenarios a ensayar.

Capítulo 6: Proporciona el modelamiento hidrológico e hidráulico realizado en el software HEC-RAS 2D, se delimita el área de estudio, se describe la configuración del terreno, geometría, condiciones de borde, la calibración y procesamiento del modelamiento para los escenarios propuestos.

Capítulo 7: Se presenta el análisis y resultados de la investigación. Entre ellos, los parámetros de calibración del simulador de lluvias, los hidrogramas experimentales de salida de los ensayos del simulador de lluvia, y los resultados del modelamiento en HEC-RAS 2D, específicamente los hidrogramas en la descarga principal de la cuenca urbana.

Finalmente, se presentan las conclusiones, recomendaciones, referencias y anexos de la investigación.

## 1.2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

El Perú es un país que cuenta con diversas regiones que exhiben características climáticas particulares; entre ellas se encuentran los andes peruanos, donde las precipitaciones generalmente son intensas. Además, en estas regiones, el proceso de urbanización se está dando de manera rápida y desordenada, con una evidente falta de planificación territorial. Esto se refleja en la falta de infraestructuras necesarias como los sistemas de drenaje pluvial. Según datos proporcionados por el Ministerio de Economía y Finanzas (MEF, 2023) el porcentaje de áreas urbanas en el Perú que carecen de servicio de drenaje urbano pluvial asciende al 98.32 %, siendo el departamento de Ayacucho aún más afectado con un 99.8 %.



Figura 1: Porcentaje de áreas urbanas sin servicio de drenaje pluvial.

Fuente: (MEF, 2023)

En la ciudad altoandina de estudio, ubicada en el departamento de Ayacucho, el principal problema son los grandes volúmenes de escorrentía generados por las lluvias intensas, dando lugar a inundaciones y erosión de las calles. Esto se ve agravado por la falta de un sistema de drenaje pluvial adecuado; así, afectando a los transeúntes, calles, vías de comunicación y el terreno aguas abajo de la cuenca urbana de la ciudad altoandina.

San Pedro de Larca se caracteriza por tener predominantemente viviendas con techos de calamina galvanizada, además cuenta con calles, plazas y veredas de concreto que disminuyen significativamente la permeabilidad del suelo. Esto ocasiona un aumento del volumen de escorrentía pluvial que discurre por las calles sin ningún tipo control ni regulación. La topografía pronunciada de la ciudad

altoandina, con pendientes de hasta un 25 %, ocasiona que las aguas pluviales discurren desde las áreas elevadas hacia las más bajas con gran velocidad, provocando erosión de las calles y generando inundaciones y encharcamiento en el transcurso de su recorrido. Finalmente, estas aguas descargan por un canal existente, utilizado para el riego, cuya capacidad es superada frente a lluvias intensas, resultando en inundaciones y erosión en la principal vía de comunicación hacia los baños termales de la ciudad altoandina San Pedro de Larcay.

Asimismo, las calles de la ciudad altoandina San Pedro de Larcay no están pavimentadas y se encuentran en mal estado, lo que complica el desplazamiento de las personas y vehículos durante las épocas de lluvias debido a lo encharcamiento que se generan.

Por tanto, ante la problemática descrita, se propone la implementación de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible (SUDS), en específico el sistema de Techo Verde con la finalidad de disminuir el volumen de escorrentía del drenaje pluvial de la ciudad altoandina San Pedro de Larcay ubicado en Ayacucho.

#### 1.2.1. Formulación del Problema

¿De qué manera los techos verdes influyen en la escorrentía del drenaje pluvial de una ciudad altoandina en Ayacucho?

### 1.3. OBJETIVOS

#### 1.3.1. Objetivo General

- Analizar la influencia de los techos verdes en la escorrentía del drenaje pluvial de una ciudad altoandina en Ayacucho.

#### 1.3.2. Objetivos Específicos

- Determinar las tormentas de diseño correspondientes a distintos periodos de retorno, para ser recreado en un simulador de lluvias.
- Diseñar y construir un simulador de lluvias para determinar los hidrogramas de respuesta de los techos verdes y techos convencionales frente a las tormentas de diseño.
- Modelar el drenaje pluvial urbano, escalando los hidrogramas experimentales obtenidos del simulador de lluvia; para determinar los hidrogramas de respuesta aguas abajo de la cuenca urbana de la ciudad altoandina.

#### 1.4. HIPÓTESIS

Los techos verdes disminuirán el volumen de la escorrentía del drenaje pluvial de la ciudad altoandina con lo que se espera sea una alternativa de solución para el problema de inundación y erosión de calles.

#### 1.5. METODOLOGÍA

El desarrollo del presente trabajo presenta una serie de pasos para cumplir con el objetivo trazado, estos se muestran en la siguiente figura.

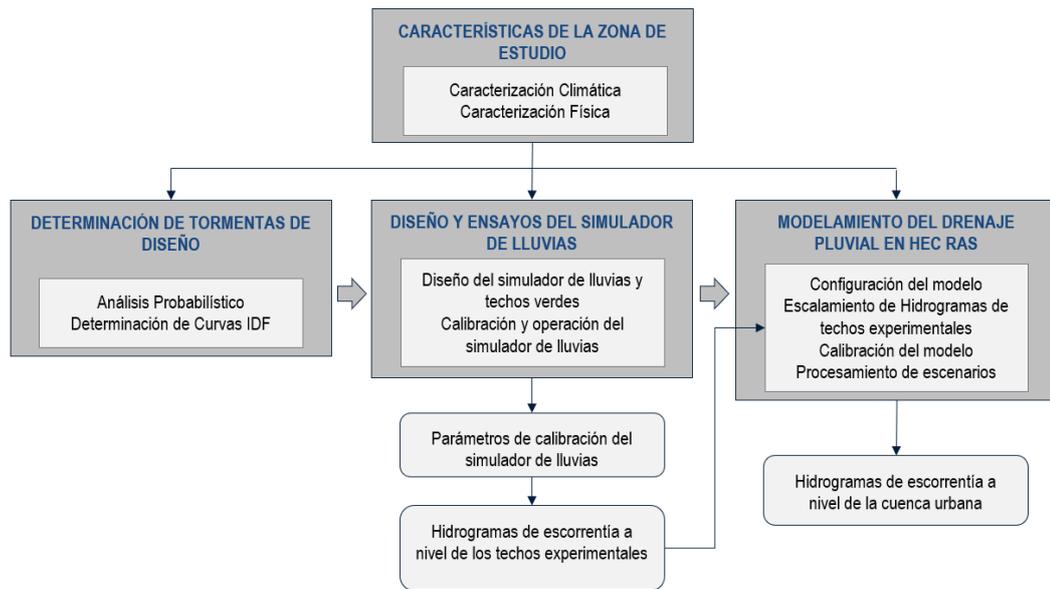


Figura 2: Metodología de Investigación

En primer lugar, se realizó la caracterización de la cuenca urbana de estudio de la ciudad altoandina, por lo que se recopiló información sobre la caracterización climática en los distintos meses del año. Asimismo, se realizó la visita a la zona de estudio para la caracterización física con la finalidad de identificar los materiales de construcción de las viviendas, el drenaje pluvial existente, características de las calles, avenidas, veredas, pendiente de techos, áreas verdes y otros elementos para un adecuado modelamiento de la cuenca urbana.

Posteriormente se determinó las tormentas de diseño, para ello se recopiló datos de precipitaciones máxima en 24 horas de la estación pluviométrica Paucaray, estación más cercana a la zona de estudio y perteneciente al SENAMHI; seguidamente, se realizó un análisis probabilístico a las precipitaciones determinándose las curvas Intensidad Duración Frecuencia (IDF) de las cuales se

tomó en consideración para el estudio intensidades para periodos de retorno de 2, 5 y 10 años (periodos de retorno recomendados para el diseño de drenaje pluvial urbano, según la norma técnica peruana), y para una duración de 10 minutos (tiempo mínimo recomendado para drenaje pluvial urbano).

Se diseñó y adaptó un simulador de lluvias, que consta de un soporte estructural (cuerpo principal del simulador) una plataforma experimental de pendiente variable (compuesta por una mitad de techo verde y la otra mitad de techo convencional), un sistema de aspersión (compuesta principalmente por boquillas de aspersión que recrean la lluvia artificial) y un sistema de lectura de datos con Arduino (compuesto por sensores de flujo que miden los hidrogramas de salida de cada techo). El sistema descrito fue calibrado mediante distintos parámetros, con el fin de aseverar que la lluvia artificial recreada sea lo suficientemente parecida a una lluvia natural. Una vez calibrado el sistema, se recrearon tormentas con intensidades para los tres periodos de retorno 2, 5 y 10 años, obteniéndose hidrogramas experimentales de respuesta para cada techo. Además, se consideró para cada intensidad variaciones de la pendiente del techo siendo estas 10 %, 15 % y 20 % de pendiente. Siendo un total de 18 hidrogramas experimentales obtenidos.

Finalmente se realizó un modelamiento hidrológico e hidráulico en HEC-RAS 2D de la cuenca urbana, donde en resumen se configuró el terreno obtenido del estudio topográfico realizado en la zona de estudio, se configuró la geometría de la cuenca urbana y se ingresó las condiciones de borde siendo estas las precipitaciones para cada periodo de retorno. Además, para los techos de las viviendas, se ingresó los hidrogramas experimentales obtenidos del simulador de lluvias, escalados según el área del techo; ya sea techo verde o techo convencional. Previa calibración de parámetros como el coeficiente de Manning y el número de curva se procedió a evaluar los 18 escenarios planteados, determinando hidrogramas de escorrentía aguas abajo de la cuenca urbana.

## 1.6. ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS

El crecimiento urbano ha provocado cambios en el uso del suelo, así como en su permeabilidad, las superficies impermeables como carreteras y viviendas se han convertido en los tipos de cobertura predominantes y han aumentado el volumen y la tasa de escorrentía superficial al tiempo que limitan la recarga de agua subterránea. Los Techos Verdes son una de las medidas para mitigar los

problemas de escorrentía excesiva en áreas urbanas; su principal ventaja en comparación con otros SUDS es la mayor extensión de superficies disponibles para la instalación, ya que pueden instalarse en cubiertas, que cubren una proporción sustancial de áreas urbanizadas. A parte de la gestión de la cantidad y calidad de la escorrentía, los techos verdes cumplen una serie de funciones en zonas urbanizadas, como la mitigación de islas de calor, mejora de la calidad de aire y la reducción de los niveles del ruido (Baryla et al., 2018).

A nivel nacional e Internacional se ha analizado la capacidad de los techos verdes en la gestión de las aguas pluviales. A continuación, se describen algunas de estas investigaciones realizadas.

#### 1.6.1. Antecedentes Nacionales

En Perú, se han realizado escasas investigaciones sobre los techos verdes, menos sobre su uso como un método para gestionar el agua de lluvia. Sin embargo, se han abordado aspectos relacionados con su función ecológica y viabilidad económica de su implementación en el país. Los pocos estudios realizados representan una fracción reducida en comparación con la extensa investigación a nivel internacional dedicada a estos sistemas.

Es relevante señalar que el Reglamento Nacional de Edificaciones (RNE) no aborda consideraciones generales para el diseño y la utilidad de los techos verdes en las edificaciones. No obstante, algunos distritos de Lima, como San Miguel, San Borja, San Isidro, Miraflores, Lince, La Molina y Barranco, han emitido normativas con el objetivo de fomentar entre sus residentes el desarrollo de techos verdes.

En el ámbito académico, Lucero (2020) realizó la tesis titulada “Implementación de techo verde como sistema pasivo en viviendas rurales altoandinas para el desarrollo de políticas públicas” cuyo objetivo fue proponer un programa de implementación de sistemas pasivos de conservación térmica para viviendas rurales ubicadas a altitudes superiores a 3500 msnm, con el fin de cumplir con las políticas públicas. La investigación adoptó dos enfoques: uno técnico, donde se propusieron techos verdes como sistema pasivo para mejorar el confort térmico en viviendas rurales, y otro orientado al desarrollo de acciones públicas mediante políticas nacionales. Como resultado, se observó un aumento de hasta 3°C en la temperatura interna de las viviendas equipadas con techos verdes en comparación con aquellas con cobertura de calamina.

Alvarado y Jara (2020) realizaron la tesis titulada “Estudio comparativo de materiales convencionales y de origen natural en la construcción de prototipos para techos verdes extensivos en la ciudad de Cajamarca, 2020” que tuvo como objetivo describir la diferencia del comportamiento, análisis económico y funcionamiento entre techos verdes construidos a base de material de origen natural y convencional; para ello se construyó cuatro prototipos, dos elaborados con material de origen natural y dos con material convencional. Los resultados de la investigación indicaron que los prototipos, a pesar de utilizar diferentes materiales en su construcción, presentaron un comportamiento similar, con porcentajes equiparables de captación de agua. Además, se concluyó que los techos verdes construidos con materiales naturales resultaron ser más económicos en un 26.23 % respecto de los elaborados con materiales convencionales.

Esteves (2016) realizó la tesis titulada “Propuesta de gestión ambiental para la implementación de una nueva línea de servicios techos verdes en la empresa Lombrisa Lambayeque – Perú, 2016”, el objetivo de este trabajo fue determinar la factibilidad de los techos verdes como una opción para reemplazar las azoteas de edificaciones, considerando su potencial beneficio empresarial y su impacto ambiental. La investigación se centró en dos variables: propuestas de gestión e implementación de techos verdes. Como resultado, se propusieron técnicas que fundamentarían el diseño de un prototipo de gestión ambiental viable.

Centeno (2021) realizó la tesis titulada “Evaluación de sistemas de regulación de temperatura en viviendas rurales diseñadas para mitigar las consecuencias del frío”. Para llevar a cabo el estudio, se construyeron tres prototipos de viviendas a escala real, cada uno equipado con techos verdes, además de una vivienda de control sin esta característica. Durante la evaluación de estos prototipos, se analizó la variación de la temperatura en el interior de las viviendas. Los resultados obtenidos indicaron que el prototipo con la mayor densidad foliar en el techo verde logró una regulación térmica superior en comparación con los demás. En términos generales, en todos los casos estudiados, se observó un aumento de la temperatura interior, lo que respalda la eficacia del techo verde como un sistema eficiente en la regulación térmica.

### 1.6.2. Antecedentes Internacionales

A nivel internacional el estudio de los techos verdes ha sido a gran profundidad. Se han llevado a cabo investigaciones con énfasis en la biodiversidad, el sustrato, la construcción de techos verdes y las pautas de diseño.

Mundialmente Alemania se destaca como uno de los países pioneros en la implementación de techos verdes, evidenciando beneficios significativos en el control de inundaciones y la mejora del medio ambiente (Amagua & Huayracocha, 2021). Otros países, como Estados Unidos, Canadá, Australia, Singapur y Japón, están llevando a cabo iniciativas sólidas para incorporar techos verdes en la construcción de nuevos edificios, y están adaptando estructuras existentes para permitir la instalación de techos verdes en un futuro próximo (Vijayaraghavan, 2016).

En este contexto internacional, se han desarrollado normativas técnicas que sirven como referencias destacadas. Entre ellas se encuentran la "Guidelines for the Planning, Construction and Maintenance of Green Roofs" (Forschungsgesellschaft Landesentwicklung, Landespflege [FLL], 2018) de Alemania y la "Standard Guide for Vegetative (Green) Roof Systems" (American Society for Testing and Materials [ASTM Internacional], 2016) de Estados Unidos. Estas normativas son fundamentales para establecer estándares en la planificación, construcción y mantenimiento de techos verdes, y se mantienen en constante actualización para reflejar los avances en la investigación y la tecnología en este campo.

Se han realizado investigaciones sobre techos verdes en varios países, una encuesta sobre las publicaciones de techos verdes que aparecieron en la base de datos ISI Web of Science reveló que Estados Unidos contribuyó con el 34 % del total de publicaciones sobre los techos verdes, mientras que los países de la Unión Europea y Asia contribuyeron con el 33 % y el 20 % respectivamente. Recientemente se ha comprendido que cada país, con sus condiciones climáticas y características de construcción únicas, debe realizar investigaciones locales para identificar los componentes necesarios para el establecimiento exitoso de techos verdes. Se reconoce que la vegetación o el sustrato exitosos en países escandinavos, por ejemplo, pueden no ser efectivos en climas tropicales (Vijayaraghavan, 2016).

En la actualidad, el sistema de techos verdes se está implementando en Latinoamérica. Argentina ha construido conjuntos residenciales con techos

verdes, y en países como Colombia, Venezuela, Ecuador y Chile, el tema de techos verdes apenas empieza a tener interés ya que han visto en este tipo de sistema una solución al impacto ambiental y la falta de áreas verdes (Amagua & Huayracocha, 2021). Además, están implementando normas técnicas para el mejor uso de esta tecnología.

Entre las investigaciones más destacadas sobre los techos verdes en relación con la capacidad de gestión de aguas pluviales se detallan a continuación.

Amagua y Huayracocha (2021) realizaron la tesis titulada “Evaluación del impacto de techos verdes en la mitigación de volúmenes de escorrentía en el drenaje urbano mediante modelos hidrológicos”. En la fase experimental construyeron prototipos de techo verde tipo extensivo que fueron sometidos a un simulador de lluvias con el fin de medir la escorrentía de los techos mediante hidrogramas experimentales. Los resultados indicaron que la implantación de techos verdes con una pendiente de 2 % redujo el caudal de escorrentía en 15.6 % el caudal pico en 32.6 %; en el caso de techo con pendiente de 5%, redujo el volumen de escorrentía en 11.3 % y el caudal pico en 27.2 %.

Pérez (2015) realizó la tesis de maestría titulada “Experiencias en el monitoreo continuo de techos verdes modulares extensivos” cuyo objetivo fue cuantificar la captación de agua de lluvia de los techos verdes extensivos mediante la implementación de módulos experimentales. Según las mediciones obtenidas, se observó un rendimiento hidrológico superior en el módulo vegetado en comparación con el módulo que contenía solo sustrato. Se logró una reducción del 34 % en la escorrentía del módulo vegetado y un aumento del 66 % en la liberación de agua a la atmósfera desde el mismo.

López et al. (2020) desarrollaron el trabajo de investigación titulado “Evaluación del impacto de un techo verdes sobre la escorrentía urbana usando un modelo a escala”. Para ello implementaron dos prototipos físicos experimentales que fueron sometidos a diferentes escenarios de lluvias, considerando tres pendientes de techos (5, 10 y 12 %), tres periodos de retorno en años (5, 10 y 25) y condiciones naturales de humedad. Se concluyó que mediante el uso de los techos verdes se reducen las tasas de flujo máximas en 16 %, incluso cuando el sustrato del techo está saturado.

León y Avellaneda (2014) desarrollaron la investigación titulada “Desempeño de cubiertas verdes como sistema de drenaje urbano sostenible” aplicado en la

ciudad de Bogotá; en este trabajo se evaluaron los helechos y sedums como planta de techo verde, utilizando sustrato reciclado de la construcción. Durante el periodo de estudio se captó 35 tormentas, se analizaron cuatro techos verdes (dos de sedums y dos de helechos) con pendientes de 2 y 5 %. En promedio se observó una capacidad de mitigación máxima del 75 % en los techos verdes intensivos (helechos) y 64 % de techos extensivos (sedums).

López et al. (2015) desarrollaron el artículo de investigación titulado “Techos verdes como solución al problema de inundaciones en medios urbano” este estudio evaluó el comportamiento del volumen de escorrentía en áreas urbanas con techos verdes; para ello se realizó una aplicación denominada “TechosVerdes.py” en Python, a fin de determinar los hidrogramas de escorrentía de calles, áreas verdes y techos. Se analizaron 13 eventos, implementando techos verdes y depósitos de lluvia, y comparándolas con la condición actual sin modificaciones. Los resultados mostraron una disminución del caudal pico, y un abatimiento de los hidrogramas en todos los casos, lo que demostró beneficios económicos al reducir el diámetro de tubería y otros elementos de la red de drenaje.

Rey (2019) realizó la tesis titulada “Propuesta de sistema de drenaje urbano sostenible para cuencas de montaña con alta pendiente” cuyo objetivo fue evaluar diversas técnicas de SUDS como soluciones frente a problemas de inundación en cuencas urbanas de alta montaña. El estudio encontró que los techos verdes tienen buen desempeño en la retención del flujo, almacenando toda la lluvia; demostrando que este SUDS tiene mejor comportamiento en mitigar la inundación, con reducciones superiores al 25 % del caudal pico en la mayoría de los casos analizados.

Trapote (2016) realizó la investigación titulada “Gestión de las aguas pluviales en entornos urbanos mediante técnicas de Drenaje Sostenible”. Se evaluaron las relaciones hidrológicas-hidráulicas de SUDS en áreas urbanas. Se estudió una supuesta cuenca urbana típica, donde se le asignó coeficientes de escorrentía según los grados de implementación de los SUDS; se aplicó cálculos convencionales como la fórmula de Manning y el Método Racional, para determinar el caudal de la red colectora del drenaje urbano. Los resultados mostraron que las disminuciones porcentuales en los coeficientes de escorrentía

generan reducciones similares en el caudal de escorrentía, disminuyendo así la posibilidad de problemas de inundación.

Ercolani et al. (2018) desarrollaron el trabajo de investigación “Evaluación del desempeño de los techos verdes para la mitigación de la escorrentía de aguas pluviales en una cuenca de captación urbana de alto riesgo de inundaciones”. Se analizó la respuesta hidrológico-hidráulica de una cuenca urbana bajo varios escenarios de implementación de techos verdes y características de lluvia. Los resultados indicaron que la implantación de techos verdes a nivel de cuencas urbanas puede considerarse una estrategia valiosa para reducir tanto el pico de flujo como el volumen en las redes de drenaje urbano, especialmente para tormentas frecuentes de menor magnitud.

## CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL

### 2.1. HIDROLOGÍA APLICADA

En este subcapítulo se presentan los conceptos usados de hidrología para la determinación de las intensidades de precipitación.

#### 2.1.1. Estadística Hidrológica

El análisis estadístico tiene la finalidad de estimar las precipitaciones e intensidades máximas para diferentes periodos de retorno, mediante la aplicación de modelos probabilísticos (Ministerio de Transportes y Comunicaciones [MTC], 2011). Para determinar los eventos máximos de precipitación se establece la distribución de probabilidad que mejor represente al comportamiento aleatorio de estos, para ello se deberá realizar pruebas de bondad de ajuste.

##### 2.1.1.1. Distribuciones de Probabilidad

Entre las funciones de distribución de probabilidad usadas comúnmente en hidrología se detallan a continuación.

- **Distribución Normal**

La función de densidad de probabilidad normal se define como:

$$f(Z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{Z^2}{2}} \text{ para } -\infty < Z < \infty \quad (1)$$

Y la función de distribución de probabilidad normal es:

$$F(Z) = \int_{-\infty}^Z \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{z^2}{2}} dz \quad (2)$$

Donde,  $Z$  es la variable estandarizada que se expresa como:

$$Z = \frac{x - \bar{x}}{S} \quad (3)$$

Donde,  $x$  es la variable independiente,  $\bar{x}$  es el parámetro de localización igual a la media aritmética de  $x$ , y  $S$  es el parámetro de escala igual a la desviación estándar de  $x$ .

- **Distribución Log Normal**

La función de densidad de probabilidad normal se define como:

$$f(Z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{Z^2}{2}} \text{ para } -\infty < Z < \infty \quad (4)$$

Y la función de distribución de probabilidad normal es:

$$F(Z) = \int_{-\infty}^Z \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{Z^2}{2}} dZ \quad (5)$$

Donde, Z es la variable estandarizada que se expresa como:

$$Z = \frac{y - \bar{x}_y}{S_y} \quad (6)$$

Donde, y es el logaritmo natural de la variable independiente x,  $\bar{x}_y$  es la media aritmética de y, y  $S_y$  es la desviación estándar de y.

- **Distribución Gumbel**

La distribución Gumbel, es una de las distribuciones de valor extremo, es también llamado Valor Extremo Tipo I. La función de distribución de probabilidades se define como:

$$F(x) = e^{-e^{-\alpha(x-\beta)}} \quad (7)$$

La función de densidad de probabilidad es entonces:

$$f(x) = \alpha e^{[-\alpha(x-\beta) - e^{-\alpha(x-\beta)}]} \quad (8)$$

Donde,  $\alpha$  y  $\beta$  son los parámetros de la función Gumbel, y se determinan de la siguiente manera:

- Para muestras muy grandes  $N > 100$

$$\alpha = \frac{1.2825}{S} \quad (9)$$

$$\beta = \bar{x} - 0.45 \quad (10)$$

- Para muestras relativamente pequeñas  $N \leq 100$

$$\alpha = \frac{\sigma_y}{S} \quad (11)$$

$$\beta = \bar{x} - \frac{\mu_y}{\alpha} \quad (12)$$

Donde,  $\mu_y$  y  $\sigma_y$  se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 1: Valores de  $\mu_y$  y  $\sigma_y$  para la distribución Gumbel.

Tamaño de la muestra ( $N$ )	$\mu_y$	$\sigma_y$
10	0.4952	0.9496
15	0.5128	1.0206
20	0.5236	1.0628
25	0.5309	1.0914
30	0.5362	1.1124
35	0.5403	1.1285
40	0.5436	1.1413
45	0.5463	1.1518
50	0.5485	1.1607
55	0.5504	1.1682
60	0.5521	1.1747
65	0.5535	1.1803
70	0.5548	1.1854
75	0.5559	1.1898
80	0.5569	1.1938
85	0.5578	1.1974
90	0.5586	1.2007
95	0.5593	1.2037
100	0.5600	1.2065

Fuente: (Aparicio, 1992)

- **Distribución Pearson III**

El factor de frecuencia  $K$  para la distribución Pearson III, se obtiene de la tabla 2 y tabla 3, considerando la probabilidad (o periodo de retorno) y el coeficiente de asimetría ( $A_g$ ).

$$A_g = \frac{N[\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^3]}{(N-1)(N-2)S^3} \quad (13)$$

Donde,  $N$  es el número de datos del registro,  $x$  es la variable independiente,  $\bar{x}$  es el promedio de los valores de  $x$ , y  $S$  es la desviación estándar de los valores de  $x$ .

Se cumple la relación:

$$X = \bar{x} + KS \quad (14)$$

Donde:

$$K = \frac{X - \bar{x}}{S} \quad (15)$$

Tabla 2: Valores de K para coeficientes de asimetría positivos

Coeficiente de Asimetría Ag	PERIODO DE RETORNO (Años)						
	2	5	10	25	50	100	200
	Probabilidad de excedencia						
	0.5	0.2	0.1	0.04	0.02	0.01	0.005
3.0	-0.396	0.420	1.180	2.278	3.152	4.051	4.970
2.9	-0.390	0.440	1.195	2.277	3.134	4.013	4.904
2.8	-0.384	0.460	1.210	2.275	3.114	3.973	4.847
2.7	-0.376	0.479	1.224	2.272	3.093	3.932	4.783
2.6	-0.368	0.499	1.238	2.267	3.071	3.889	4.718
2.5	-0.360	0.518	1.250	2.262	3.048	3.845	4.652
2.4	-0.351	0.537	1.262	2.256	3.023	3.800	4.584
2.3	-0.341	0.555	1.274	2.248	2.997	3.753	4.515
2.2	-0.330	0.574	1.284	2.240	2.970	3.705	4.444
2.1	-0.319	0.592	1.294	2.230	2.942	3.656	4.372
2.0	-0.307	0.609	1.302	2.219	2.912	3.605	4.298
1.9	-0.294	0.627	1.310	2.207	2.881	3.553	4.223
1.8	-0.282	0.643	1.318	2.193	2.848	3.499	4.147
1.7	-0.268	0.660	1.324	2.179	2.815	3.444	4.069
1.6	-0.254	0.675	1.329	2.163	2.780	3.388	3.990
1.5	-0.240	0.690	1.333	2.146	2.743	3.330	3.910
1.4	-0.225	0.705	1.337	2.128	2.703	3.271	3.828
1.3	-0.210	0.719	1.339	2.108	2.666	3.211	3.745
1.2	-0.195	0.732	1.340	2.087	2.626	3.149	3.661
1.1	-0.180	0.745	1.341	2.066	2.585	3.087	3.575
1.0	-0.164	0.758	1.340	2.043	2.542	3.022	3.489
0.9	-0.148	0.769	1.339	2.018	2.498	2.957	3.401
0.8	-0.132	0.780	1.336	1.993	2.453	2.891	3.312
0.7	-0.116	0.790	1.333	1.967	2.407	2.824	3.223
0.6	-0.099	0.800	1.328	1.939	2.359	2.755	3.132
0.5	-0.083	0.808	1.323	1.910	2.311	2.686	3.041
0.4	-0.066	0.816	1.317	1.880	2.261	2.615	2.949
0.3	-0.050	0.824	1.309	1.849	2.211	2.544	2.856
0.2	-0.033	0.830	1.301	1.818	2.159	2.472	2.763
0.1	-0.017	0.836	1.292	1.785	2.107	2.400	2.670
0.0	0.000	0.842	1.282	1.751	2.054	2.326	2.576

Fuente: (Chow et al., 1994)

Tabla 3: Valores de K para coeficientes de asimetría negativos

Coeficiente de Asimetría Ag	PERIODO DE RETORNO (Años)						
	2	5	10	25	50	100	200
	Probabilidad de excedencia						
	0.5	0.2	0.1	0.04	0.02	0.01	0.005
-0.1	0.017	0.846	1.270	1.716	2.000	2.252	2.248
-0.2	0.033	0.850	1.258	1.680	1.945	2.178	2.388
-0.3	0.050	0.853	1.245	1.643	1.890	2.104	2.294
-0.4	0.066	0.855	1.231	1.606	1.834	2.029	2.201
-0.5	0.083	0.856	1.216	1.567	1.777	1.955	2.108
-0.6	0.099	0.857	1.200	1.528	1.720	1.880	2.016
-0.7	0.116	0.857	1.183	1.488	1.663	1.806	1.926
-0.8	0.132	0.856	1.166	1.448	1.606	1.733	1.837
-0.9	0.148	0.854	1.147	1.407	1.549	1.660	1.749

Coeficiente de Asimetría $A_g$	PERIODO DE RETORNO (Años)						
	2	5	10	25	50	100	200
	Probabilidad de excedencia						
	0.5	0.2	0.1	0.04	0.02	0.01	0.005
-1.0	0.164	0.852	1.128	1.366	1.492	1.588	1.664
-1.1	0.180	0.848	1.107	1.324	1.435	1.518	1.581
-1.2	0.195	0.844	1.086	1.282	1.379	1.449	1.501
-1.3	0.210	0.838	1.064	1.240	1.324	1.383	1.424
-1.4	0.225	0.832	1.041	1.198	1.270	1.318	1.351
-1.5	0.240	0.825	1.018	1.157	1.217	1.256	1.282
-1.6	0.254	0.817	0.994	1.116	1.166	1.197	1.216
-1.7	0.268	0.808	0.970	1.075	1.116	1.140	1.155
-1.8	0.282	0.799	0.945	1.035	1.069	1.087	1.097
-1.9	0.294	0.788	0.920	0.996	1.023	1.037	1.044
-2.0	0.307	0.777	0.895	0.959	0.980	0.990	0.995
-2.1	0.319	0.765	0.869	0.923	0.939	0.946	0.949
-2.2	0.330	0.752	0.844	0.888	0.900	0.905	0.907
-2.3	0.341	0.739	0.819	0.855	0.864	0.867	0.869
-2.4	0.351	0.725	0.795	0.823	0.830	0.832	0.833
-2.5	0.360	0.711	0.771	0.793	0.798	0.799	0.800
-2.6	0.368	0.696	0.747	0.764	0.768	0.769	0.769
-2.7	0.376	0.681	0.724	0.738	0.740	0.740	0.741
-2.8	0.384	0.666	0.702	0.712	0.714	0.714	0.714
-2.9	0.390	0.651	0.681	0.683	0.689	0.690	0.690
-3.0	0.396	0.636	0.660	0.666	0.666	0.667	0.667

Fuente: (Chow et al., 1994)

- **Distribución Log Pearson III**

La distribución Log Pearson III, se obtiene cuando se usan los logaritmos de los datos observados con la distribución Pearson III. El factor de frecuencia  $K$ , se obtiene de la tabla 2 y tabla 3, considerando la probabilidad (o el periodo de retorno) y el coeficiente de asimetría ( $A_g$ ).

$$A_g = \frac{N \left[ \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{x}_y)^3 \right]}{(N - 1)(N - 2)S_y^3} \quad (16)$$

Donde,  $N$  es número de datos del registro,  $y$  es el logaritmo natural de la variable independiente  $x$ ,  $\bar{x}_y$  es el promedio de los valores de  $y$ , y  $S_y$  es la desviación estándar de los valores de  $y$ .

Se cumple la relación de:

$$Y = \bar{x}_y + KS_y \quad (17)$$

Donde:

$$K = \frac{Y - \bar{x}_y}{S_y} \quad (18)$$

### 2.1.1.2. Pruebas de Bondad de Ajuste

Las pruebas de bondad de ajuste permiten identificar cuál de las funciones de distribución de probabilidad aplicadas se ajusta mejor al conjunto de datos. Las pruebas de bondad de ajuste más conocidas son la Chi-cuadrado y la Kolmogorov – Smirnov, las cuales se describen a continuación.

- **Prueba Chi-Cuadrado  $X^2$**

La prueba Chi-Cuadrado fue propuesta por Karl Pearson en 1990. Para aplicar la prueba, el primer paso es dividir los datos en un número  $k$  de intervalos de clase; luego se calcula el parámetro estadístico:

$$Xc^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(\theta_i - e_i)^2}{e_i} \quad (19)$$

Donde,  $\theta_i$  es el número de valores observados en intervalo de clase “ $i$ ” y  $e_i$  es el número de valores esperados en Intervalo de clase “ $i$ ”. Se calcula como:

$$e_i = N[F(S_i) - F(I_i)] \quad i = 1, 2, \dots, k \quad (20)$$

Donde,  $F(S_i)$  es la función de distribución de probabilidad en límite superior del intervalo  $i$  y  $F(I_i)$  es la función de distribución de probabilidad en límite inferior del intervalo  $i$  y  $N$  el número de eventos.

El valor de Chi-cuadrado calculado  $Xc^2$  obtenido por la ecuación, se compara con el valor de Chi-cuadrado teórico  $Xt^2$  de la tabla 4, cuyo valor se determina con el nivel de significación y grados de libertad.

- Nivel de significación:  $\alpha$  por lo general  $\alpha = 5\%$
- Grados de libertad:  $gl = k - h - 1$ .

Donde:

$h = 2$  para Distribución Normal, Log Normal y Gumbel

$h = 3$  para Distribución Pearson III y Log Pearson III

El criterio de decisión se fundamenta en la comparación de valor calculado de Chi-cuadrado con el valor teórico encontrado, esto es:

- Si:  $Xc^2 \leq Xt^2$  entonces, el registro se ajusta a la distribución de probabilidades para el nivel de significación

- Si:  $Xc^2 > Xt^2$  entonces, el registro no se ajusta a la distribución de probabilidades para el nivel de significación; se debe probar otra distribución teórica.

Esta prueba en la práctica se usa para cualquier modelo de ajuste, pero estrictamente es válido solo para la normal, puesto que ha sido desarrollado con base en los datos normales e independientes (Villón, 2006).

Tabla 4: Distribución de Chi-cuadrado  $X^2$

Grados de Libertad	Probabilidad de encontrar un valor mayor o igual que el chi cuadrado tabulado								
	0.0010	0.0025	0.005	0.01	0.025	0.05	0.10	0.15	0.20
1	10.8274	9.1404	7.8794	6.6349	5.0239	3.8415	2.7055	2.0722	1.6424
2	13.8150	11.9827	10.5965	9.2104	7.3778	5.9915	4.6052	3.7942	3.2189
3	16.2660	14.3202	12.8381	11.3449	9.3484	7.8147	6.2514	5.3170	4.6416
4	18.4662	16.4238	14.8602	13.2767	11.1433	9.4877	7.7794	6.7449	5.9886
5	20.5147	18.3854	16.7496	15.0863	12.8325	11.0705	9.2363	8.1152	7.2893
6	22.4575	20.2491	18.5475	16.8119	14.4494	12.5916	10.6446	9.4461	8.5581
7	24.3213	22.0402	20.2777	18.4753	16.0128	14.0671	12.0170	10.7479	9.8032
8	26.1239	23.7742	21.9549	20.0902	17.5345	15.5073	13.3616	12.0271	11.0301
9	27.8767	25.4625	23.5893	21.6660	19.0228	16.9190	14.6837	13.2880	12.2421
10	29.5879	27.1119	25.1881	23.2093	20.4832	18.3070	15.9872	14.5339	13.4420
11	31.2635	28.7291	26.7569	24.7250	21.9200	19.6752	17.2750	15.7671	14.6314
12	32.9092	30.3182	28.2997	26.2170	23.3367	21.0261	18.5493	16.9893	15.8120
13	34.5274	31.8830	29.8193	27.6882	24.7356	22.3620	19.8119	18.2020	16.9848
14	36.1239	33.4262	31.3194	29.1412	26.1189	23.6848	21.0641	19.4062	18.1508
15	37.6978	34.9494	32.8015	30.5780	27.4884	24.9958	22.3071	20.6030	19.3107
16	39.2518	36.4555	34.2671	31.9999	28.8453	26.2962	23.5418	21.7931	20.4651
17	40.7911	37.9462	35.7184	33.4087	30.1910	27.5871	24.7690	22.9770	21.6146
18	42.3119	39.4220	37.1564	34.8052	31.5264	28.8693	25.9894	24.1555	22.7595
19	43.8194	40.8847	38.5821	36.1908	32.8523	30.1435	27.2036	25.3289	23.9004
20	45.3142	42.3358	39.9969	37.5663	34.1696	31.4104	28.4120	26.4976	25.0375

Fuente: (Villón, 2006)

- **Prueba Kolmogorov – Smirnov**

La prueba de ajuste Kolmogorov – Smirnov, consiste en comparar el máximo valor absoluto de la diferencia  $\Delta c$  con un valor teórico  $\Delta t$  que depende del número de datos  $N$  y el nivel de significación  $\alpha$  de la tabla 5.

$$\Delta c = \max |F(x) - P(x)| \tag{21}$$

Donde,  $\Delta c$  es el estadístico de Kolmogorov – Smirnov calculado,  $F(x)$  es la función de distribución de probabilidad de ajuste y  $P(x)$  es la función de distribución de probabilidad observada, que se calcula como:

$$P(x) = 1 - \frac{m}{N + 1} \quad (22)$$

Donde,  $m$  es número de orden de dato  $x$  en una lista de mayor a menor y  $N$  es el número total de datos.

El criterio de decisión se fundamenta en la comparación de valor calculado con el valor teórico encontrado, esto es:

- Si:  $\Delta c \leq \Delta t$  entonces, el registro se ajusta a la distribución de probabilidades para el nivel de significación considerado.
- Si:  $\Delta c > \Delta t$  entonces, el registro no se ajusta a la distribución de probabilidades para el nivel de significación considerado; se debe probar con otra distribución teórica.

Esta prueba es aplicable a distribuciones de datos no agrupados, es decir, no se requiere hacer intervalos de clase.

Tabla 5: Valores de  $\Delta t$ , para valores de  $N$  y niveles de significación  $\alpha$

Tamaño muestral $N$	Nivel de significación $\alpha$				
	0.2	0.15	0.1	0.05	0.01
1	0.900	0.925	0.950	0.975	0.995
2	0.684	0.726	0.776	0.842	0.929
3	0.565	0.597	0.642	0.708	0.828
4	0.494	0.525	0.564	0.624	0.733
5	0.446	0.474	0.510	0.565	0.669
6	0.410	0.436	0.470	0.521	0.618
7	0.381	0.405	0.438	0.486	0.577
8	0.358	0.381	0.411	0.457	0.543
9	0.339	0.360	0.388	0.432	0.514
10	0.322	0.342	0.368	0.410	0.490
11	0.307	0.326	0.352	0.391	0.468
12	0.295	0.313	0.338	0.375	0.450
13	0.284	0.302	0.325	0.361	0.433
14	0.274	0.292	0.314	0.349	0.418
15	0.266	0.283	0.304	0.338	0.404
16	0.258	0.274	0.295	0.328	0.392
17	0.250	0.266	0.286	0.318	0.381
18	0.244	0.259	0.278	0.309	0.371
19	0.237	0.252	0.272	0.301	0.363
20	0.231	0.246	0.264	0.294	0.356
25	0.210	0.220	0.240	0.270	0.320
30	0.190	0.200	0.220	0.240	0.290
35	0.180	0.190	0.210	0.230	0.270
$N > 35$	$\frac{1.07}{\sqrt{N}}$	$\frac{1.14}{\sqrt{N}}$	$\frac{1.22}{\sqrt{N}}$	$\frac{1.36}{\sqrt{N}}$	$\frac{1.63}{\sqrt{N}}$

Fuente: (Aparicio, 1992)

### 2.1.2. Periodo de Retorno

El periodo de retorno (T) o intervalo de recurrencia, es el número de años que en promedio se presenta un evento. Los caudales de diseño de la infraestructura para drenar la escorrentía de precipitaciones de moderada frecuencia con fin de prevenir inundaciones de edificaciones, carreteras y áreas colindantes se consideran periodos de retorno de 2, 5, 10 o menor a 25 años según la Norma Técnica CE.040 Drenaje Pluvial del Reglamento Nacional de Edificaciones (Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento [MVCS], 2021).

### 2.1.3. Tormentas de Diseño

Una tormenta de diseño es un patrón de precipitación definido para utilizarse en el diseño de un sistema hidrológico. Una tormenta de diseño puede definirse mediante un valor de profundidad de precipitación en un punto, mediante un hietograma de diseño que especifique la distribución temporal de la precipitación durante una tormenta (Chow et al., 1994).

Las tormentas de diseño pueden basarse en información histórica de precipitación en un sitio o pueden construirse utilizando características generales de la precipitación en regiones adyacentes. Su aplicación va desde el uso de valores puntuales de precipitación en el método racional para determinar los caudales picos en alcantarillados de aguas lluvias y alcantarillas de carreteras, hasta el uso de hietogramas de tormenta como las entradas para el análisis de lluvia-escorrentía en embalses de detención de aguas urbanas o en el diseño de vertederos en proyectos que involucren grades embalses (Chow et al., 1994).

### 2.1.4. Curvas Intensidad Duración Frecuencia (IDF)

Uno de los primeros pasos que debe seguirse en muchos proyectos de diseño hidrológico como el diseño de un drenaje pluvial urbano, es la determinación del evento de lluvia que deben usarse. La forma más común de hacerlo es utilizar una tormenta de diseño o un evento que involucre una relación entre la intensidad de lluvia, la duración y las frecuencias o periodos de retorno apropiados para la obra y el sitio (Chow et al., 1994).

La intensidad es la tasa temporal de precipitación, es decir, la profundidad por unidad de tiempo (mm/h). Puede ser la intensidad instantánea o la intensidad promedio sobre la duración de la lluvia. Comúnmente se utiliza la intensidad promedio que puede expresarse como se muestra (Chow et al., 1994).

$$i = \frac{P}{T_d} \quad (23)$$

Donde  $P$  es la profundidad de lluvia (mm) y  $T_d$  es la duración, dada usualmente en horas. La frecuencia se expresa en función del periodo de retorno,  $T$ , que es el intervalo de tiempo promedio entre varios eventos de precipitación que igualan o exceden la magnitud de diseño (Chow et al., 1994).

Las curvas IDF son un elemento de diseño que relacionan la intensidad de la lluvia, la duración de esta y la frecuencia con la que se puede presentar, es decir su probabilidad de ocurrencia o el periodo de retorno, según MTC (2011).

Para determinar estas curvas IDF se necesita contar con registros pluviográficos de lluvia en el lugar de interés y seleccionar la lluvia más intensa de diferentes duraciones en cada año, con el fin de realizar un estudio de frecuencia con cada una de las series formadas (MTC, 2011).

Para el caso de duraciones de tormenta menores a 1 hora, o no se cuente con registros pluviográficos que permitan obtener las intensidades máximas, estas pueden ser calculadas mediante la metodología de Dyck y Peschke, que relaciona la duración de la tormenta con la precipitación máxima en 24 horas. La expresión es la siguiente:

$$P_d = P_{24h} \left( \frac{d}{1440} \right)^{0.25} \quad (24)$$

Donde,  $P_d$  es la precipitación total (mm),  $d$  es la duración en minutos y  $P_{24h}$  es la precipitación máxima en 24 horas (mm). La intensidad se halla dividiendo la precipitación  $P_d$  entre la duración.

Las curvas IDF se calculan indirectamente con la siguiente relación:

$$I = \frac{KT^m}{d^n} \quad (25)$$

Donde,  $I$  es la intensidad máxima (mm/h),  $T$  es el periodo de retorno (años),  $d$  es la duración de la precipitación (minutos) y  $K, m, n$  son las constantes características de la zona de estudio.

Tomando logaritmo a la expresión anterior:

$$\ln(I) = \ln(K) + m \ln(T) - n \ln(d) \quad (26)$$

Lo cual es equivalente a:

$$Y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 \quad (27)$$

Los valores de  $a_0$ ,  $a_1$  y  $a_2$  se obtienen aplicando regresión lineal múltiple a los datos hallados.

### 2.1.5. Hietograma de Diseño

El hietograma es la distribución temporal de la intensidad o precipitación a lo largo del tiempo de duración de la precipitación. Una forma simple para desarrollar un hietograma de diseño es mediante el método del Bloque Alterno. Este método es utilizado como dato de precipitación en programas de modelamiento hidrológico. Además, es uno de los métodos más extendidos para obtener una lluvia de proyecto a partir de la curva IDF.

El método del bloque alternativo divide la duración total de la lluvia ( $D$ ) en un número  $n$  de intervalos de tiempo  $\Delta t$ . Luego, utiliza los datos de intensidad de precipitación ( $I$ ) de la curva IDF para duraciones  $\Delta t$ ,  $2\Delta t$ ,  $3\Delta t$ ,  $4\Delta t$ ,..., así como la precipitación total obtenida multiplicando las intensidades por las duraciones de la lluvia. Finalmente, estos bloques de lluvia se reordenan de manera que el mayor valor esté en medio de la serie, y los demás bloques se van alternando en orden descendente alternativamente hacia la derecha y hacia la izquierda del bloque central, formando de esta manera el hietograma de diseño (Gómez, 2007).

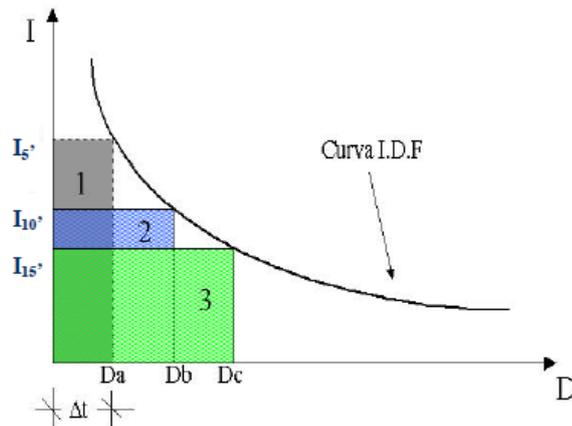


Figura 3: Método de los bloques alternos

Fuente: (Gómez, 2007)

### 2.1.6. Infiltración

Es el proceso en el cual el agua penetra desde la superficie del terreno hacia el suelo. Los factores que influyen en la tasa de infiltración son la condición de la superficie del terreno, la cobertura vegetal, las propiedades del suelo como son la

conductividad hidráulica y la porosidad, y el contenido de humedad que presenta el suelo (Chow et al., 1994).

Aun cuando la infiltración se puede medir a través de métodos directos e indirectos, describir el proceso de infiltración resulta muy complejo debido a la variabilidad de las condiciones iniciales del suelo. Por su parte, existen ecuaciones matemáticas que pueden describir el proceso de forma aproximada.

#### 2.1.7. Método SCS Número de Curva (CN)

El Soil Conservation Service (SCS) desarrolló un método para estimar las abstracciones. Este método parte de considerar que la precipitación efectiva  $P_e$  es siempre menor o igual la profundidad de precipitación total  $P$ ; de igual manera, luego que la escorrentía se inicia, la profundidad adicional del agua retenida en la cuenca  $F_a$  es menor a alguna retención potencial máxima  $S$ . La escorrentía potencial es  $P - I_a$ , donde la es la abstracción inicial antes del encharcamiento para la cual no se generará escorrentía (Chow et al., 1994). En resumen, el método se basa en la siguiente relación:

$$\frac{F_a}{S} = \frac{P_e}{P - I_a} \quad (28)$$

Aplicando continuidad y despejando para  $P_e$  se tiene la siguiente relación:

$$P_e = P - I_a - F_a \quad (29)$$

La siguiente figura muestra las variables que considera el SCS para desarrolla el método de abstracciones.

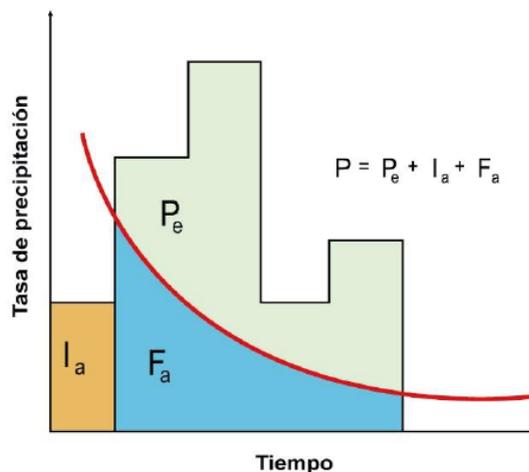


Figura 4: Variables de método de atracción de precipitaciones del SCS

Fuente: Adaptado de Chow et al. (1994)

El Soil Conservation Service (SCS) estableció una relación para estimar las abstracciones iniciales ( $I_a$ ) en mm, a partir de la retención potencial máxima del suelo ( $S$ ), mediante la siguiente expresión:

$$I_a = 0.2S \quad (30)$$

Donde,  $S$  es:

$$S = \left( \frac{1000}{CN} - 10 \right) \times 25.4 \quad (31)$$

Al resolver las ecuaciones anteriores para la precipitación efectiva, se obtiene la siguiente expresión:

$$P_e = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S} \quad (32)$$

A fin de estandarizar este método se definió el Número de curva (CN) que es un parámetro empírico y su valor es un número adimensional que varía entre 0 y 100; donde una superficie con  $CN = 0$  indica que no hay escurrimiento ya que toda la lluvia se infiltra y otra superficie con  $CN = 100$  indica que es impermeable o una superficie de agua, por lo que toda la lluvia genera escorrentía directa.

El CN toma en cuenta tres posibles situaciones de humedad antecedente denominadas como Condiciones Antecedentes de Humedad: secas (Tipo I), normales (Tipo II) y húmedas (Tipo III). La clasificación es determinada a partir de la precipitación total en los cinco días previos a éste y de la época del año.

Tabla 6: Condiciones antecedentes de humedad en función de la lluvia

Condiciones Antecedentes de Humedad	Lluvias antecedentes total 5 días (pulg)	
	Estación Inactiva	Estación de crecimiento
Tipo I	Menor que 0.5	Menor que 1.4
Tipo II	Entre 0.5 y 1.1	Entre 1.4 y 2.1
Tipo III	Sobre 1.1	Sobre 2.1

Fuente: (Chow et al., 1994)

Los valores del CN han sido tabulados en base al tipo del suelo y al uso de la tierra. El tipo de suelo es clasificado en 4 grupos de suelos hidrológicos, como se detalla en la siguiente tabla.

Tabla 7: Grupo Hidrológico del suelo según el SCS

Grupo Hidrológico del Suelo	Textura	Drenaje
A	Arena profunda, suelos profundos depositados por el viento, limos agregados	Excesivo
B	Suelos poco profundos depositados por el viento, marga arenosa.	Bueno a moderado
C	Margas arcillosas, margas arenosas poco profundas, suelos con bajo contenido orgánico y suelos con altos contenidos de arcilla.	Imperfecto
D	Suelos que se expanden significativamente cuando se mojan, arcillas altamente plásticas y ciertos suelos salinos.	Pobre o muy pobre

Fuente: (Chow et al., 1994)

En la tabla 8 se dan los valores de CN en condiciones normales (Tipo II) para cada tipo de uso de la tierra. Para una cuenca formada por varios tipos de suelos y con diferentes usos de la tierra, se puede calcular un CN ponderado.

A partir del CN en condiciones normales (Tipo II), se puede calcular el CN para las condiciones secas (Tipo I) o húmedas (Tipo III) con las siguientes ecuaciones:

$$CN(I) = \frac{4.2CN(II)}{10 - 0.058CN(II)} \quad (33)$$

$$CN(III) = \frac{23CN(II)}{10 + 0.13CN(II)} \quad (34)$$

Tabla 8: CN para cada uso de la tierra en condición de Tipo II

Descripción del Uso de la Tierra	Grupo Hidrológico del Suelo			
	A	B	C	D
Tierra cultivada:				
Sin tratamiento de conservación	72	81	88	91
Con tratamiento de conservación	62	71	78	81
Pastizales:				
Condiciones pobres	68	79	86	89
Condiciones óptimas	39	61	74	80
Vegas de ríos:				
Condiciones óptimas	30	58	71	78
Bosques:				
Troncos delgados, cubierta pobre, sin hierbas	45	66	77	83
Cubierta buena	25	55	70	77
Áreas abiertas (césped, parques, campos, etc.)				
Óptimas condiciones: cubierta de pasto en el 75 % o más	39	61	74	80
Condiciones aceptables: cubierta de pasto en el 50 al 75 %	49	69	79	84
Áreas comerciales de negocios (85 % impermeables)	89	92	94	95

Descripción del Uso de la Tierra	Grupo Hidrológico del Suelo			
	A	B	C	D
Distritos industriales (72 % impermeables)	81	88	91	93
Residencial:				
Tamaño promedio del lote      Porcentaje impermeable				
1/8 acre o menos                      65	77	85	90	92
1/4 acre                                      38	61	75	83	87
1/3 acre                                      30	57	72	81	86
1/2 acre                                      25	54	70	80	85
1 acre                                              20	51	68	79	84
Parqueaderos pavimentados, techos, accesos, etc.	98	98	98	98
Calles y carreteras:				
Pavimentados con cunetas y alcantarillas	98	98	98	98
Grava	76	85	89	91
Tierra	72	82	87	89

Fuente: (Chow et al., 1994)

## 2.2. DRENAJE PLUVIAL URBANO

### 2.2.1. Hidrología Urbana

La urbanización de una cuenca induce cambios en su respuesta hidrológica durante eventos de lluvia, debido a la alteración de las redes de drenaje natural y al aumento de la impermeabilidad de la superficie mediante materiales menos rugosos, con el objetivo de lograr una evacuación más eficiente y rápida del área drenada. Este proceso afecta la hidrología de la cuenca y en especial a las zonas aguas abajo (Gómez, 2007).

En la Figura 5 se representa una cuenca en estado natural antes de la urbanización, donde el flujo es más lento debido al proceso de infiltración y al estancamiento natural. Sin embargo, tras el desarrollo urbano, la escorrentía de las áreas urbanas se concentra y se transmite de la manera más rápida posible a través de canaletas, tuberías, canales y carreteras (Yana, 2021).

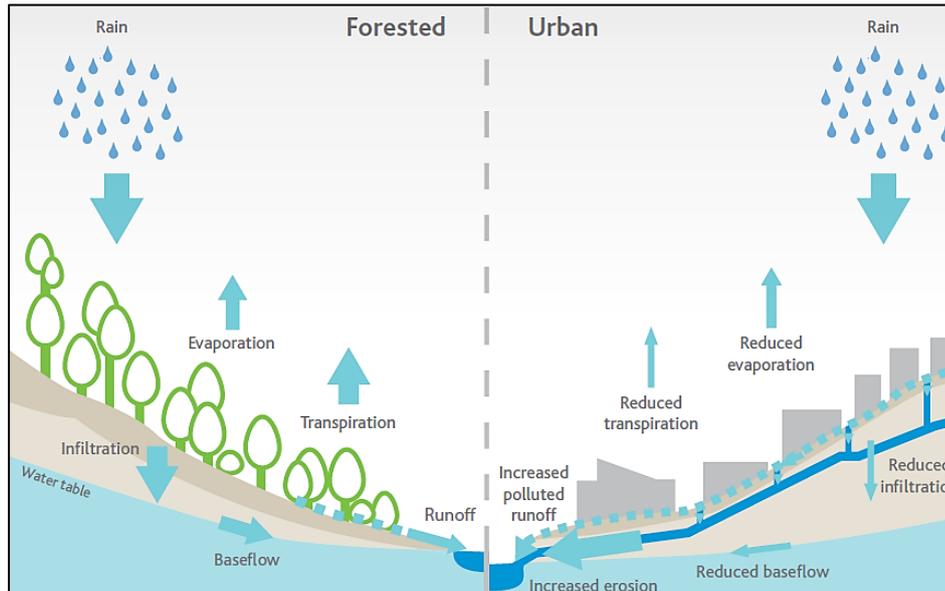


Figura 5: Esgurrimento de aguas pluviales en cuencas naturales y urbana.

Fuente: (Melbourne Water, 2013)

En la Figura 6 se observan algunos cambios inducidos por el desarrollo urbano en los hidrogramas de escorrentía.

- Aumento del volumen de escorrentía: El incremento de las superficies impermeables sobre la cobertura natural de una cuenca puede resultar en un aumento significativo del volumen total de escorrentía. Esto se debe a que la lluvia que normalmente sería interceptada, frenada, infiltrada o evaporada, ahora se transporta directamente a través del sistema urbano de aguas pluviales hacia los cursos de agua ubicados aguas abajo.
- Aumento del caudal pico y velocidad máxima: Esto es una consecuencia de la disminución de la permeabilidad del suelo y la reducción de la rugosidad de los cursos de agua. La concentración del caudal se realiza de manera más rápida, alcanzando velocidades mucho más elevadas. Esto puede dar lugar a problemas como inundaciones, erosión y degradación ambiental aguas abajo.
- Reducción del tiempo del caudal punta y del tiempo de concentración: Esto se debe al incremento del caudal punta y la velocidad. Los tiempos de respuesta en el hidrograma son más rápidos, y las duraciones del flujo son más cortas.

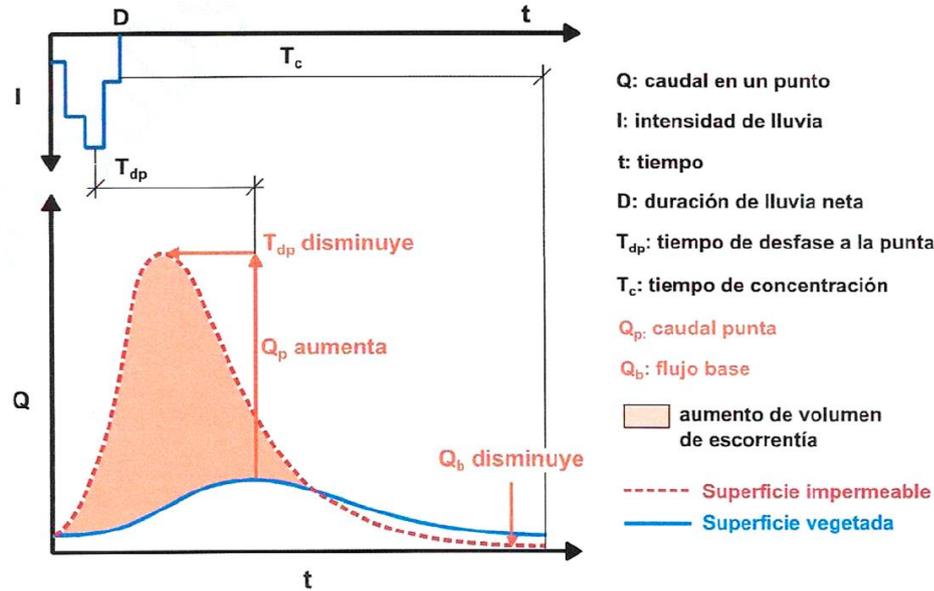


Figura 6: Efectos del desarrollo urbano en la transformación lluvia-escorrentía.

Fuente: (Trapote, 2016)

### 2.2.2. Estudio de flujo en Calles

En una cuenca urbana, la escorrentía superficial se transporta a través de los colectores, canales y principalmente por las calles. El movimiento del agua que se produce en este entorno urbano se conoce como flujo no permanente o no estacionario en lámina libre, también denominado gradualmente variable en lámina libre. En este tipo de flujo, se aplican los principios físicos de conservación de la masa o ecuación de continuidad, y la ecuación de conservación de la cantidad de momento, esta última derivada de la segunda ley de Newton (Yana, 2021)

Para el estudio del movimiento del flujo no permanente en lámina libre, Barré de Saint-Vennat (1871) dedujo las siguientes ecuaciones:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = q \quad (35)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial Q^2}{\partial x A} + gA \frac{\partial y}{\partial x} - gA(S_o - S_f) = 0 \quad (36)$$

Donde  $Q$  es el caudal,  $A$  el área del flujo,  $q$  un caudal de entrada normalmente distribuido,  $y$  el calado,  $S_o$  la pendiente de la solera,  $S_f$  la pendiente de fricción o motriz,  $g$  la aceleración de la gravedad,  $x$  espacio y  $t$  el tiempo.

Estas ecuaciones de Saint-Venant se han deducido considerando flujos unidimensionales y son ecuaciones en derivadas parciales, no lineales y de tipo

hiperbólico, por lo que no tienen solución analítica y deben ser resueltos mediante métodos numéricos para llegar a soluciones aproximadas. En la Figura 7 se muestran los métodos aproximados más habituales en términos variables de la velocidad ( $V$ ), calado ( $y$ ), pendiente de la solera ( $S_o$ ), pendiente de la fricción ( $S_f$ ), aceleración de la gravedad ( $g$ ), espacio ( $x$ ) y tiempo ( $t$ ). (Yana, 2021)

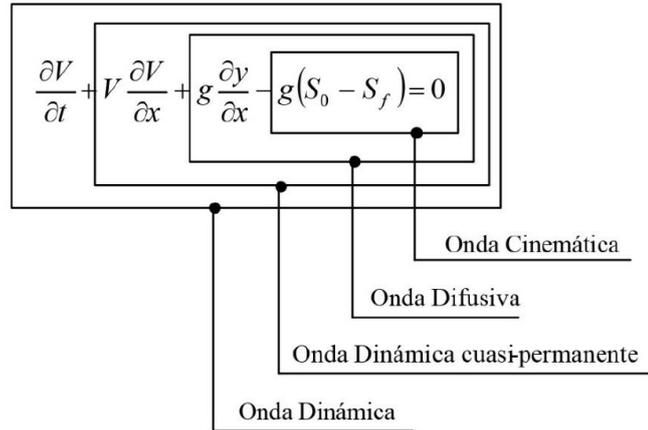


Figura 7: Aproximaciones de solución a las Ecuaciones de Saint-Venant.

Fuente: (Yana, 2021)

Todos estos métodos de aproximación incluyen también a la ecuación de continuidad, y se diferencian entre sí de acuerdo con sus términos tomados en cuenta (Yana, 2021):

- Onda Dinámica: Incluye a todos los términos de la ecuación dinámica (componentes inerciales, presión, gravedad y fricción), por lo tanto, es la que se aproxima más a la realidad de lo que sucede en un sistema de drenaje.
- Onda Dinámica Cuasi-permanente: De todos los términos de la ecuación dinámica solo se desprecia un término de los componentes inerciales, que es la variación local de la velocidad.
- Onda Difusiva: De todos los términos de ecuación dinámica, solo se desprecian los términos inerciales.
- Onda Cinemática: De todos los términos de la ecuación dinámica solo considera la ecuación de equilibrio de fuerzas; es decir, a los componentes de gravedad y fricción.

## 2.3. TECHOS VERDES

### 2.3.1. Definición

Un techo verde, también conocido como techo con vegetación, techo ecológico, azotea verde, cubierta verde o en inglés "green roof"; es un sistema que consiste en cubrir la superficie de un techo con múltiples componentes. Estos componentes incluyen una capa de vegetación plantada en un medio de cultivo, colocado sobre una capa de drenaje que intercepta las aguas pluviales y una capa impermeable que evita la filtración del agua hacia el interior del techo.

### 2.3.2. Beneficios

Los techos verdes ofrecen beneficios económicos, ambientales y sociales para el edificio individual y el entorno urbano más amplio. Estos beneficios van desde los impactos de la gestión de aguas pluviales en la infraestructura local hasta los beneficios de servicios para los ocupantes del edificio y la comunidad. Algunos de los beneficios que presentan los techos verdes según IGRA (2018) se muestran a continuación.

- Gestión de aguas pluviales

Los techos verdes retienen el agua de lluvia que cae sobre este y la devuelve directamente al ciclo del agua mediante el proceso de evaporación. El exceso de agua de lluvia se filtra y se drena con un retraso temporal (IGRA, 2018).

- Reducción del efecto de isla de calor

Durante los meses de verano, muchas ciudades se convierten en verdaderas "islas de calor". El área impermeable cada vez mayor y el calor residual del tráfico, la industria y los sistemas de calefacción son parte de la razón por la cual las ciudades son cálidas. Los techos verdes pueden moderar el clima urbano y reducir el calor urbano al dar sombra a la superficie del techo, absorber la energía del sol y evaporar el agua (IGRA, 2018).

- Biodiversidad

Los techos verdes pueden dar a las plantas y animales un reemplazo para su hábitat natural. Las aves, las abejas silvestres y las mariposas pueden encontrar alimento y refugio aquí y crear un ecosistema vivo (IGRA, 2018).

- Paisaje natural

La vista sobre los techos verdes aumenta la calidad de vida. Incluso unas pocas islas en flor pueden ayudar a romper la monotonía de los centros urbanos de hormigón y asfalto gris y, por lo tanto, pueden mejorar el entorno de vida (IGRA, 2018).

- Protección de la impermeabilización

Los techos verdes forman un amortiguador natural contra el clima y otros efectos ambientales, y pueden duplicar la vida útil de la impermeabilización (IGRA, 2018).

- Mejoran la calidad del aire

Gracias a que las plantas son capaces de fijar CO<sub>2</sub> y de generar oxígeno a cambio, se reduce la contaminación y además disminuye la concentración de gases que contribuyen al efecto invernadero. Además, filtran el polvo y las partículas tóxicas, lo que mejora la calidad del aire (IGRA, 2018).

- Absorción del sonido

El sustrato por sí solo es un buen aislante del sonido. Si además se agrega la rugosidad que aportan las plantas para romper las ondas sonoras, se obtiene como resultado un lugar silencioso donde trabajar y poder concentrarse (IGRA, 2018).

- Mejora el comportamiento energético de los edificios

El sustrato por sí solo es un excelente aislante térmico. Si además hay plantas que impidan que ese sustrato se el interior de la edificación se sentirá más comfortable. Esto generará también un ahorro en los costos de climatizar un edificio, sobre todo en las zonas cálidas del país. En las zonas frías, también hay un ahorro en calefacción o una mejor conservación de la temperatura, ya que el calor que haya dentro del edificio no se va a ir tan fácilmente a través del techo. Es decir, hay ahorro de energía en diferentes condiciones ambientales (IGRA, 2018).

### 2.3.3. Tipos

Los techos verdes se dividen en tres tipos diferentes, dependiendo del uso, los factores de construcción y el método utilizado para llevar a cabo el trabajo. Estos

juegan un papel fundamental en la determinación de los tipos de plantas que se seleccionan y cómo se verá la vegetación.

Tabla 9: Características de los tipos de techos verdes

	<b>TECHO VERDE EXTENSIVO</b>	<b>TECHO VERDE SEMI - INTENSIVO</b>	<b>TECHO VERDE INTENSIVO</b>
<b>Mantenimiento</b>	Bajo	Periódicamente	Alto
<b>Vegetación</b>	Musgos, sedum, suculentas, hierbas y pastos	Pastos, Hierbas y Arbustos	Césped o plantas perennes, arbustos y árboles
<b>Riego</b>	Ninguno	Periódicamente	Regularmente
<b>Accesibilidad</b>	Bajo	Medio	Alto
<b>Espesor de sustrato</b>	5 – 15 cm	15 – 30 cm	30 – 100 cm
<b>Carga estructural</b>	60 – 150 kg/cm <sup>2</sup>	120 – 200 kg/cm <sup>2</sup>	180 – 500 kg/cm <sup>2</sup>
<b>Costo</b>	Bajo	Medio	Alto
<b>Gestión de agua pluvial</b>	Bajo	Medio	Alto

Fuente: (IGRA, 2018; Contreras & Castillo, 2015)

Debido a la mayor profundidad general, los techos verdes intensivos brindan beneficios significativos para la gestión de aguas pluviales, la creación de hábitats y el aislamiento térmico y acústico; sin embargo, esta profundidad adicional también agrega un peso significativo además de requerir más riego; por lo tanto, previo a la selección de este tipo de techo verde, se debe analizar la integridad estructural del edificio y el acceso al agua.

Un sistema extensivo de techo verde se usa comúnmente en situaciones donde no se desea un soporte estructural adicional, esto minimiza la demanda estructural del techo. Los techos verdes extensivos no están diseñados para ser accedidos regularmente. Sin embargo, es importante tener cierto grado de acceso para el mantenimiento.

#### 2.3.4. Componentes de los Techos Verdes Extensivos

Los techos verdes extensivos se componen de una capa de vegetación, un medio de cultivo, una capa de drenaje, una capa de filtro, capa de barrera de raíces, finalmente de una membrana impermeable.

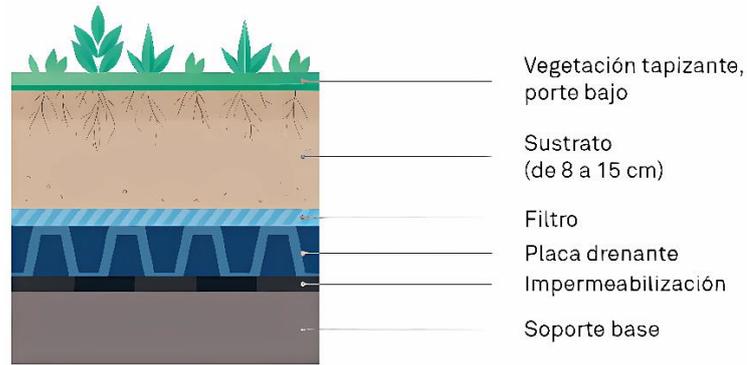


Figura 8: Componentes de los techos verdes extensivos.

Fuente: Adaptado de Contreras y Castillo (2015)

#### 2.3.4.1. Impermeabilización

Es la responsable de mantener la edificación libre de humedad, impidiendo que el agua de riego o lluvia que ha saturado el sustrato penetre en el soporte estructural. Debe ser muy buena su elección, ya que, al ser el primer componente de la cubierta vegetal, es el de más difícil acceso.

Existe una gran variedad de materiales usados como impermeabilizante y a la vez protección de raíces. Entre los más usados están las membranas de PVC y el HDPE.

#### 2.3.4.2. Barrera de Raíces

El propósito de una barrera de raíces es para evitar que las raíces de las plantas penetren al interior del techo. La barrera de penetración de raíces debe colocarse de manera que permita que las raíces de las plantas accedan al agua retenida (ASTM Internacional, 2016).

Esta capa es fundamental, ya que las plantas pueden llegar a ser muy destructivas en su búsqueda de agua y nutrientes. En algunos casos, la membrana de impermeabilización es también barrera anti-raíces, por lo que cumple una función doble.

#### 2.3.4.3. Capa de Drenaje

El propósito principal de la capa de drenaje es eliminar el exceso de agua del techo y mantener las condiciones aeróbicas en el medio vegetal del techo. Para que una capa de drenaje sea efectiva, debe permitir que el agua se filtre verticalmente en la capa y también proporcionar suficiente transmisividad

hidráulica para transportar el flujo inferior horizontalmente a la instalación de descarga (ASTM Internacional, 2016).

Las capas de drenaje se dividen en dos clases básicas: capas de drenaje granulares (agregado grueso) y capas de drenaje de geo compuestos (esteras de filamentos poliméricos enredados y láminas de plástico con forma)

#### *2.3.4.4. Capa de Filtro*

El propósito de una capa de filtro es evitar que las partículas finas del medio del suelo migren a la capa de drenaje y provoquen obstrucciones o reduzcan la capacidad de drenaje de la capa de drenaje. Las telas utilizadas como capas de filtro deben tener una permitividad suficientemente alta para permitir que el agua se filtre rápidamente hacia la capa de drenaje subyacente (ASTM Internacional, 2016).

La capa de filtro puede ser independiente de la capa de drenaje o una parte integral de una capa de drenaje de geo compuesto. Generalmente se utiliza geotextil de polipropileno no tejido, punzonado.

#### *2.3.4.5. Sustrato de crecimiento*

El propósito de los sustratos de crecimiento es mantener la vida de las plantas durante un período prolongado, alojar una concentración densa de raíces, funcionar como depósito de humedad, respaldar un drenaje eficiente durante las lluvias y proteger los componentes subyacentes del sistema de techo verde. (ASTM Internacional, 2016)

La FLL (2018) recomienda que los sustratos del techo verde presente una distribución de partículas, tal que el contenido de limos y arcillas no exceda el 15% en masa.

Para la composición de la capa del sustrato, la ASTM Internacional (2016) recomienda 70 % a 80 % de materiales inorgánicos livianos y un máximo de 30 % de materia orgánica.

#### *2.3.4.6. Vegetación*

Las plantas constituyen la capa superior, que agrega vida al sistema de techo verde. Más específicamente, el éxito de cualquier techo verde depende de qué tan saludables sean las plantas. El agua siempre es un factor limitante en los ambientes de los techos y su disponibilidad fluctúa entre los eventos de lluvia.

Además, las restricciones de carga de construcción limitan la profundidad y el peso del sustrato (Vijayaraghavan, 2016).

La vegetación generalmente está compuesta de musgos, sedum, hierbas, pastos y plantas nativas; para elegir la mejor opción se toma en cuenta las condiciones en las cuales se construye el techo verde.

El criterio de elección de plantas es la siguiente según *Toxement (2018)* son:

- Expectativa de vida
- Resistencia condiciones ambientales (incluso extremas)
- Buen aspecto visual
- Fácil propagación, pero no invasiva
- Bajo mantenimiento
- Raíces poco profundas
- Requerimientos bajo de nutrientes
- Requerimiento de bajo riego

#### 2.3.5. Consideraciones de Diseño

Una vez que se ha tomado la decisión de diseño para incorporar un techo verde en el edificio, se deben abordar varios problemas clave para garantizar un diseño sólido que se traducirá sin problemas en una buena construcción. Si bien la elección de qué tipo de techo verde a menudo estará dictada por las características específicas del sitio, se debe considerar los siguientes detalles (Vijayaraghavan, 2016):

- Condiciones estructurales
- Mantenimiento
- Drenaje sostenible
- Condiciones climáticas
- Irrigación
- Pendiente de techo

## 2.4. SIMULACIÓN DE LLUVIAS

### 2.4.1. Definición

Se puede definir la lluvia simulada como la técnica de aplicación de agua a parcelas de manera similar a la lluvia natural. Los simuladores de lluvia se pueden clasificar en términos generales en dos grupos más grandes; simuladores formadores de gotas y de boquilla presurizada (Ngasoh et al., 2020).

### 2.4.2. Antecedentes

En los EEUU, los trabajos de simulación comienzan a principios de la década de 1930 continuando a través de los años de 1940 y acelerando a mediados de la década de 1950 siguiendo esta serie de experiencias con desarrollo bastante modesto durante algunos años. Durante las últimas décadas ha habido un gran desarrollo evidenciado por el aumento del número de personas que están construyendo y usando simuladores con nuevos diseños o modificaciones y mejoramiento de diseños existentes (Cáceres, 2008).

### 2.4.3. Importancia

Los simuladores de lluvia son herramientas valiosas que ofrecen la capacidad de replicar lluvias de manera controlada en cualquier momento, evitando las demoras asociadas con las condiciones climáticas naturales. Esta versatilidad hace que los simuladores sean útiles en diversos contextos pedagógicos, adaptándose a diferentes áreas de estudio (Luengas & De La Rosa, 2015). La importancia de comprender aspectos específicos del ciclo hidrológico, como la relación entre lluvia y escorrentía, infiltración, salpicadura y flujo superficial, ha elevado la relevancia de los simuladores de lluvia (Monge & Aguilar, 2008).

### 2.4.4. Tipos de simuladores de lluvia

#### 2.4.4.1. Simuladores por goteo

También conocido como formador de gotas, utiliza hilo colgante o agujas hipodérmicas para producir gotas del tamaño necesario a velocidad cero. Su velocidad de impacto se logra por caída libre, lo que hizo que otros lo definieran como un simulador no presurizado (Ngasoh et al., 2020).

No es práctico para el campo ya que requiere una gran distancia de al menos 10 m de altura para alcanzar la velocidad terminal. Otra limitación de este simulador es que la simulación solo se lleva a cabo en una parcela limitada dependiendo del

tamaño del hilo colgante. No produce gotas de distribución a menos que se utilice una variedad de tubos de tamaño de formación de gotas (Ngasoh et al., 2020).

#### 2.4.4.2. *Simuladores presurizados*

Produce una distribución de gotas que incluye una gama pequeña y grande de tamaños de gota con una velocidad inicial distinta de cero y una velocidad de impacto similar a la velocidad terminal de las gotas de lluvia. Para obtener gotas de tamaños adecuados manteniendo una alta velocidad, se requieren boquillas de alta descarga (Ngasoh et al., 2020).

Se pueden usar en el campo y sus intensidades se pueden variar más que el tipo de simulador de formación de gotas. Dado que el simulador de toberas tiene una velocidad inicial mayor a cero, requiere menor altura para reproducir la velocidad terminal obtenida de la lluvia natural. Este simulador suele ser portátil en comparación con el anterior (Ngasoh et al., 2020).

#### 2.4.5. Características y requerimientos importantes

Una serie de investigadores describieron algunas de las más importantes características usadas en las investigaciones hidrológicas, de erosión, infiltración y escurrimiento para conseguir una apropiada simulación de lluvias (Cáceres, 2008). La simulación de lluvia debe ejemplificar la siguiente característica fundamental de la lluvia natural (Ngasoh et al., 2020).

- Intensidad de las lluvias
- Distribución de uniformidad de lluvia
- Distribución del tamaño de gotas

##### 2.4.5.1. *La intensidad de las lluvias*

Una de las principales formas de evaluar los simuladores de lluvia es mediante la intensidad de la lluvia simulada, que es el medio por el cual se definen otras características de la lluvia (Yakubu & Yusop, 2017). El método para controlar la intensidad de la lluvia varía en el simulador de lluvia. En el caso de los simuladores de toberas presurizadas, la intensidad y el diámetro de gota se controlan variando la presión o introduciendo un cuerpo en movimiento basculante o giratorio debajo de la tobera (Ngasoh et al., 2020).

#### 2.4.5.2. Distribución de uniformidad de lluvia

En la lluvia simulada en una parcela, la uniformidad es una de las medidas más importantes para determinar qué tan distribuida espacialmente está la lluvia en una parcela para evitar el encharcamiento y la saturación excesiva en un lado. El grado de uniformidad depende del tipo de lluvia. Se estima utilizando la ecuación del coeficiente de uniformidad de Christiansen ( $C_u$ ) como se presenta en la ecuación (Kim et al., 2018).

$$C_u = \left( 1 - \frac{\sum_{i=1}^n |x_i - \bar{x}|}{n\bar{x}} \right) \times 100 \% \quad (37)$$

Donde,  $x_i$  es la cantidad de lluvia en la ubicación  $i$ ,  $\bar{x}$  es la cantidad media de lluvia y  $n$  es el número total de observaciones.

El  $C_u$  es la desviación de la media normalizada por la intensidad de lluvia promedio de los respectivos puntos de observación para caracterizar la variabilidad espacial de la lluvia. Cuanto más se acerque el valor al 100 %, más uniforme será la distribución espacial de las lluvias. Para parcelas experimentales grandes, un valor de ( $C_u$ ) del 70 % se considera razonablemente aceptable (Kim et al., 2018).

#### 2.4.5.3. Distribución del tamaño de gota

La distribución del tamaño de las gotas simulada debe ser cercana a las gotas de las lluvias naturales. La lluvia natural tiene un amplio rango de tamaños de gota cerca a cero hasta siete milímetros (0 - 7 mm), la media del diámetro de la gota esta entre 1 y 3 mm y tiene tendencia a incrementar con la intensidad de la lluvia (Cáceres, 2008).

La medición del tamaño de las gotas de lluvia se ha estudiado utilizando varios enfoques, pero no existe un estándar establecido para obtener el tamaño del diámetro de las gotas de lluvia. Básicamente, se utilizan dos métodos para determinar el tamaño de la gota; medición manual de gotas de lluvia (tinción, gránulos de harina, inmersión en aceite y métodos fotográficos) y medición automática de gotas de lluvia (disdrómetros de impacto (acústicos y de desplazamiento); disdrómetro óptico (imagen y dispersión ópticas)) (Ngasoh et al., 2020).

#### 2.4.6. Diseño y Requerimientos

Para lograr con éxito las características de lluvia natural enumeradas anteriormente, un diseñador de un simulador de lluvia debe tener en cuenta las

siguientes características: presión de la bomba, altura de los simuladores, tamaño de la parcela y distancia entre boquillas. Cada una de estas características físicas tiene un impacto en el propósito para el cual está diseñado el simulador de lluvia (Ngasoh et al., 2020).

#### 2.4.7. Sensores de Flujo

Un sensor de flujo o caudalímetro electrónico es un instrumento para la medición de caudal de un fluido. Los caudalímetros suelen colocarse directamente en la tubería que transporta el fluido.



Figura 9: Sensor de Flujo.

Fuente: (Lindao, 2018)

El funcionamiento del sensor se describe de la siguiente manera: el flujo de agua ingresa al sensor y provoca el giro de una turbina. Esta turbina está conectada a un imán que activa un sensor de efecto Hall, a su vez emite un pulso eléctrico que puede ser detectado por la entrada digital de una placa Arduino. Dado que el volumen de agua asociado a cada pulso es fijo y tiene un valor conocido, podemos contar la cantidad de pulsos por unidad de tiempo. Posteriormente, multiplicamos este valor por el volumen correspondiente a cada pulso y la cantidad total de pulsos para determinar el caudal de agua.

La salida de pulsos es una onda cuadrada cuya frecuencia es proporcional al caudal. El factor de conversión de frecuencia (Hz) a caudal (L/min) varía entre modelos y depende de la presión, densidad, e incluso del mismo caudal.

$$f(\text{Hz}) = K \cdot Q(\text{L}/\text{min}) \quad (38)$$

Donde K es el factor de conversión, siendo K=7.5 para el sensor de 1/2" y K=5.5 para el sensor de 3/4" trabajar con dichos valores no garantiza precisión, por lo que si se requiere mayor exactitud es necesario calibrar y calcular dicho factor.

Para tener una medición más exacta es necesario calcular el valor del factor de conversión que el que nos sirve para pasar de frecuencia de pulsos a caudal de agua. La variable que podemos medir con exactitud es la cantidad de pulsos usando el Arduino, y con ayuda de un recipiente con graduación se puede medir la cantidad o volumen de agua. Estas dos variables se pueden medir con exactitud, para calcular el factor de conversión con estas dos variables se puede utilizar la siguiente fórmula:

$$K = \frac{N^{\circ} \text{ pulsos}}{\text{Volumen} \times 60} \quad (39)$$

Donde,  $K$  es el factor de conversión,  $N^{\circ} \text{ pulsos}$  son la cantidad de pulsos medidos con el sensor correspondientes al  $\text{Volumen}$  que es el volumen de agua en litros que pasa por el sensor.

## 2.5. MODELAMIENTO EN HEC-RAS

### 2.5.1. Simulación Numérica

La simulación numérica abarca el desarrollo de un modelo que puede ser bidimensional, que permita estudiar el comportamiento de un escenario predictivo en comparación con los resultados reales o experimentales, para la optimización de diseños y procesos. En Ingeniería, se encuentran problemas complejos como el comportamiento hidráulico del flujo en diferentes escenarios, para ello, se hace uso del modelamiento hidráulico, lo cual requiere de la simulación de un fenómeno real, frente a una representación gráfica que involucra características similares, que servirá para conocer el comportamiento del evento de acuerdo con información cuantificable (Alvarez & Moreno, 2021).

### 2.5.2. Modelo HEC-RAS 2D

#### 2.5.2.1. Definición

HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center - River Analysis System) es un software de modelamiento hidráulico. Permite realizar sistemas hidráulicos de flujo constante unidimensional; cálculos hidráulicos de flujo inestable unidimensional y bidimensional; modelos de lecho móvil de transporte de sedimentos de flujo casi inestable y completamente inestable; análisis de la temperatura del agua; y modelado generalizado de la calidad del agua (US Army Corps of Engineers [USACE], 2023).

El modelamiento se puede realizar con flujo permanente y flujo no permanente gradualmente variado. El primero está basado en la ecuación de energía unidimensional, mientras que el segundo se fundamenta en la ecuación de continuidad y la ecuación de conservación de momento (Orellana, 2021).

#### 2.5.2.2. *Ventajas y Capacidades del modelo 2D HEC-RAS*

El algoritmo de modelado de flujo en HEC-RAS tiene las siguientes capacidades:

- Puede realizar modelado 1D, 2D y 1D/2D combinados: La capacidad de realizar un modelado 1D/2D combinado dentro del mismo modelo de flujo inestable permite trabajar en sistemas fluviales más grandes, utilizando el modelado 1D cuando corresponda y el modelado 2D en áreas que requieren un nivel más alto de fidelidad hidrodinámica (USACE, 2023).
- Ecuaciones de aguas poco profundas (SWE) o Ecuaciones de ondas de difusión (DWE) en 2D: En general, las ecuaciones de onda de difusión 2D permiten que el software se ejecute más rápido y tenga mayores propiedades de estabilidad. Las ecuaciones 2D de aguas poco profundas son aplicables a una gama más amplia de problemas. Sin embargo, muchas situaciones de modelado se pueden modelar con precisión con las ecuaciones de onda de difusión 2D (USACE, 2023).
- Algoritmo implícito de solución de volumen finito: El solucionador de ecuaciones de flujo no estacionario 2D utiliza un algoritmo de volumen finito implícito. El algoritmo de solución implícita permite pasos de tiempo computacional más grandes que los métodos explícitos. El método de volumen finito proporciona un incremento de estabilidad y robustez mejoradas sobre las técnicas tradicionales de diferencias finitas y elementos finitos. Además, el algoritmo puede manejar regímenes de flujo subcrítico, supercrítico y mixto (flujo que pasa por una profundidad crítica, como un salto hidráulico) sin ninguna opción especial para activar (USACE, 2023).
- Mallas computacionales no estructuradas o estructuradas: El software fue diseñado para usar mallas computacionales no estructuradas, pero también puede manejar mallas estructuradas. El software asume que las celdas son ortogonales entre sí. Asumir la ortogonalidad simplifica algunos de los cálculos necesarios y mejora la velocidad de cálculo. Esto significa que las celdas

computacionales pueden ser triángulos, cuadrados, rectángulos o incluso elementos de cinco y seis con un límite de hasta ocho lados (USACE, 2023).

- Tablas detalladas de propiedades hidráulicas para celdas computacionales 2D y caras de celdas: Dentro de HEC-RAS, las celdas computacionales no deben tener un fondo plano, y las caras de las celdas no tienen que ser una línea recta, con una sola elevación. En cambio, cada celda computacional y cara de celda se basa en los detalles del terreno subyacente. Este tipo de modelo a menudo se denomina en la literatura como un "modelo de subred de alta resolución". El término "subcuadrícula" significa que utiliza el terreno subyacente detallado (subcuadrícula) para desarrollar las tablas de propiedades geométricas e hidráulicas que representan las celdas y las caras de las celdas. HEC-RAS tiene un preprocesador de área de flujo 2D que procesa las celdas y las caras de las celdas en tablas detalladas de propiedades hidráulicas basadas en el terreno subyacente utilizado en el proceso de modelado (USACE, 2023).
- Mapeo detallado de inundaciones y animaciones de inundaciones: El mapeo del área inundada, así como las animaciones de la inundación, se pueden realizar dentro de HEC-RAS utilizando las funciones de RAS Mapper. El mapeo de las áreas de flujo 2D se basa en los niveles del terreno subyacente detallado (USACE, 2023).

### CAPÍTULO III: CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

#### 3.1. DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA ZONA DE ESTUDIO

El proyecto fue desarrollado en una ciudad altoandina ubicada en la sierra del Perú que políticamente corresponde a:

Departamento: Ayacucho

Provincia: Sucre

Distrito: San Pedro de Larcay

Localidad: San Pedro de Larcay



Figura 10: Mapa de ubicación del departamento Ayacucho.

Fuente: (Instituto Nacional de Estadística e Informática [INEI], 2018).

El distrito de San Pedro de Larcay está ubicado en la Cordillera Central de los Andes Peruanos, en la margen izquierda del río Chicha; al sureste de la provincia de Sucre, contando con una superficie de 310.07 km<sup>2</sup>. San Pedro de Larcay, es uno de los 11 distritos que conforman la provincia de Sucre y limita por el norte con el distrito de Soras, por el oeste con el Distrito de Soras, por el sur con la provincia de Lucanas y por el este por el departamento de Apurímac. Tiene coordenadas latitud sur 14° 10' 7.9", y de longitud oeste 73° 34' 22.2".

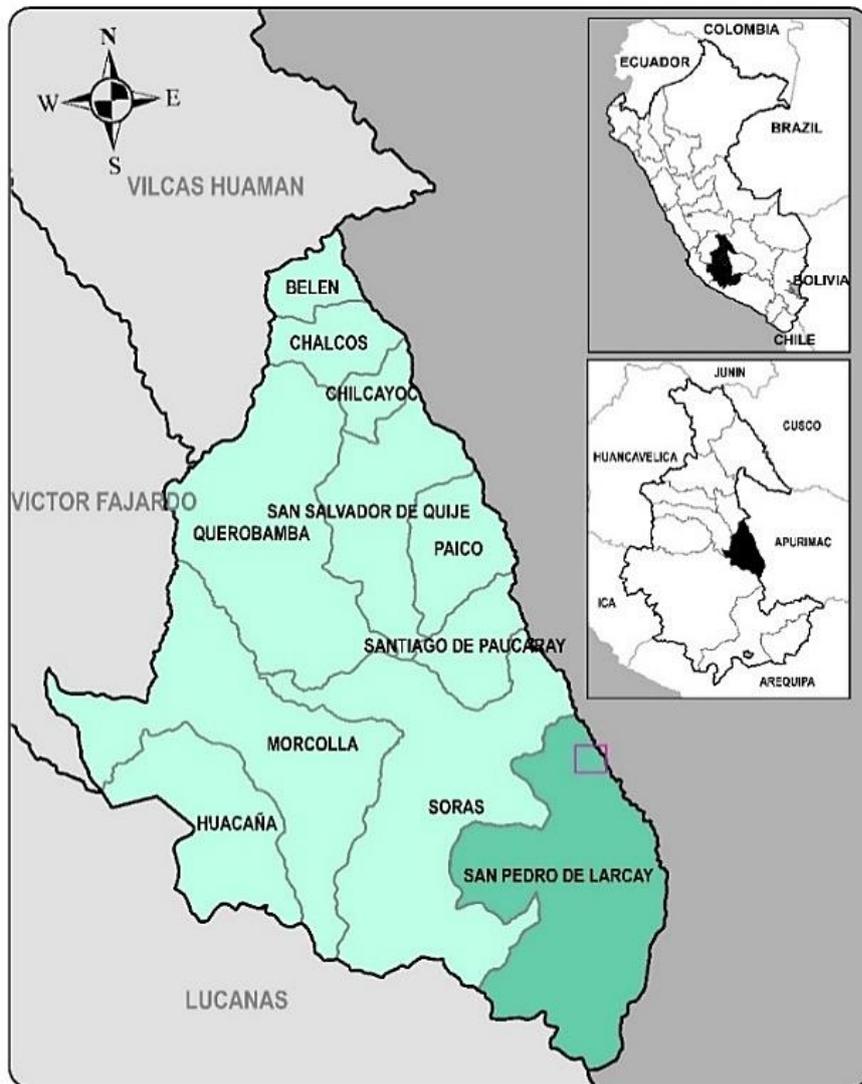


Figura 11: Mapa de ubicación de la provincia Sucre.

El centro poblado San Pedro de Larcay tiene una población aproximada de 438 habitantes, y pertenece a la región natural quechua a una altitud promedio de 3395 msnm (INEI, 2018)



Figura 12: Regiones naturales del Perú.

Fuente: (Comisión de Promoción del Perú para la Exportación y el Turismo [PROMPERU], 2019)



Figura 13: Centro poblado San Pedro de Larcay.

Fuente: (Comunidad de Larcay, 2022)

### 3.2. CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA

Se presenta dos temporadas bien marcadas, una que empieza en diciembre y termina en abril, caracterizada por ser lluviosa que se intensifican de enero, febrero y marzo; y otra que empieza en mayo y termina en noviembre, con menos precipitaciones. Además, de junio a agosto se produce la baja de las temperaturas o heladas, que llega a descender por debajo de los 0° C; asimismo, en este último

mes se caracteriza por los fuertes vientos que llegan a los 19 Km/h; y de setiembre a noviembre se caracteriza por la llegada de la primavera.

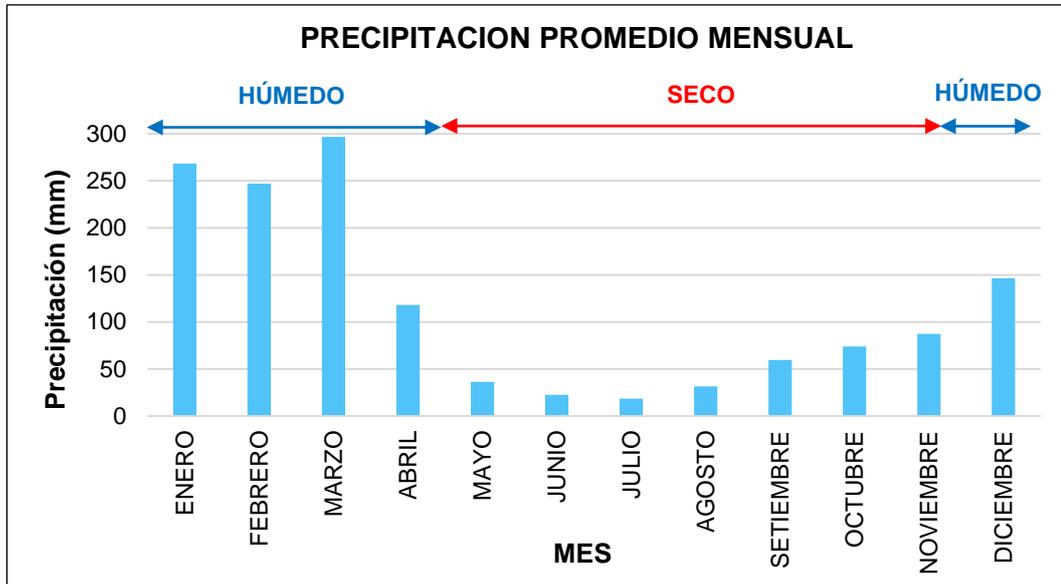


Figura 14: Precipitaciones promedio mensual (Estación Paucaray).

La temperatura media anual fluctúa entre 4° C y 16° C; las máximas entre 17° C y 23° C; y las mínimas (mayo hasta agosto) entre 5° C y - 6° C, sin embargo, es cambiante debido a los fenómenos climatológicos que se vienen registrando.

### 3.3. CARACTERIZACIÓN FÍSICA

#### 3.3.1. Información Topográfica

Dado a que no se contaba con información topográfica de la zona de estudio, se realizó un levantamiento topográfico para obtener la información necesaria para el estudio.

La recolección de información topográfica se realizó mediante la técnica denominada fotogrametría; que consistió en un levantamiento fotogramétrico con dron con la aeronave "Mavic 2 Pro DJI" sobre el centro poblado San Pedro de Larcay.

El trabajo en campo inició con el vuelo despegando la aeronave desde el punto con coordenadas UTM 18L E:653862 N:8433552 dentro del centro poblado; se abarcó un área total de vuelo de 35 ha con un área efectiva de 22 ha, realizados en un tiempo de 2 horas.

Los parámetros de vuelo del dron fueron: altura de 100 metros, traslape frontal de 80 %, traslape lateral de 75 % y una velocidad de 10 m/s.

Como resultado del trabajo en campo se obtuvo la información topográfica almacenada en un Modelo Digital de Elevaciones (DEM) que abarca toda la cuenca urbana de interés y alrededores con una resolución de 0.5 metros. Además de una ortofoto de alta resolución (5 cm) obtenida a una altura de 100 metros.

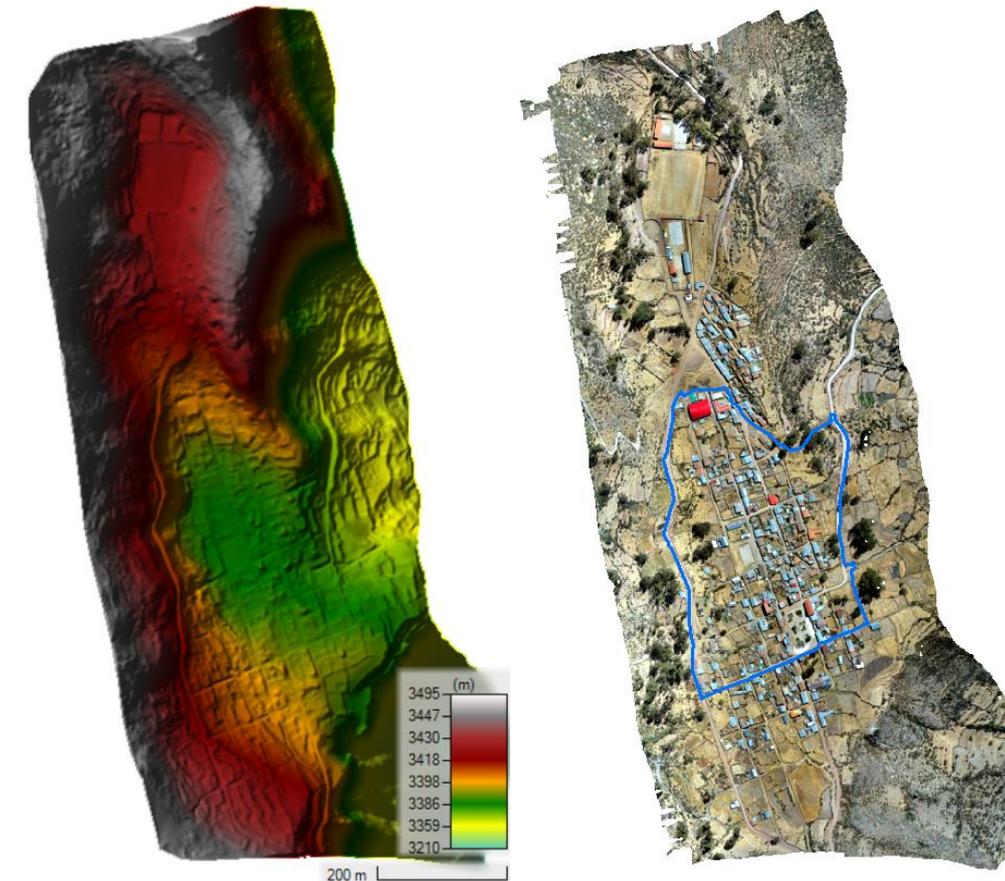


Figura 15: DEM y ortofoto con límite de cuenca urbana

Entre las características más importantes encontradas del levantamiento topográfico fueron que el terreno presenta pendientes que van desde los 0 % hasta los 22 % dentro de la cuenca urbana de interés.

### 3.3.2. Uso de suelo

La cuenca urbana en estudio del centro poblado San Pedro de Larcay cuenta con cobertura vegetal y zona de urbanización principalmente, según el estudio de campo, presenta la siguiente cobertura o uso de suelo (Se puede apreciar con mayor detalle en el Anexo A. Mapa de uso de suelos).

Tabla 10. Uso de suelo de la cuenca urbana.

USO DE SUELO	ÁREA (m <sup>2</sup> )	PORCENTAJE
Vivienda	17796	17.3%
Jardín	376	0.4%
Pastizal	32798	31.9%
Cultivo	11345	11.0%
Patio de vivienda	14251	13.9%
Losa de concreto	1737	1.7%
Muro	3282	3.2%
Carretera	20840	20.3%
Canales y alcantarilla	325	0.3%
<b>TOTAL</b>	<b>102 750</b>	<b>100%</b>

### 3.3.3. Descripción de las viviendas, techos y jardines

En la cuenca urbana de estudio, existe un total de 17793 m<sup>2</sup> de área cubierta por viviendas, cuyos techos están contruidos con calamina, teja y concreto. Las superficies de cada material de techo se muestran en la tabla 11, donde el material predominante de techos es la calamina.

Tabla 11. Material de techo de viviendas de cuenca urbana

MATERIAL DE TECHO	ÁREA (m <sup>2</sup> )	PORCENTAJE
Calamina	11391	64%
Teja	5582	31%
Concreto	823	5%
<b>TOTAL</b>	<b>17796</b>	<b>100%</b>

La vivienda típica es de adobe de dos pisos, con techos de calamina a dos aguas, como se muestra en la siguiente fotografía. La pendiente de los techos oscila entre 10 a 20 % siendo en un promedio un valor de 15 %, esto debido a que existe la ocurrencia de lluvias en los meses de diciembre a abril, con cierta intensidad considerable.

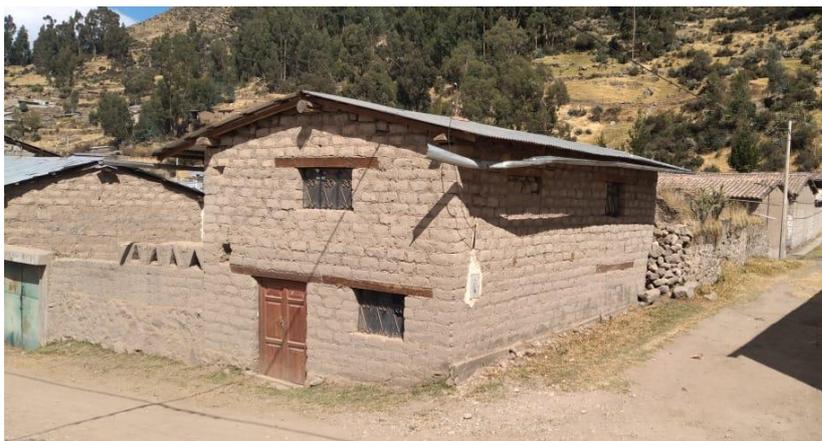


Figura 16: Vivienda típica de cuenca urbana, San Pedro de Larcay.

Los techos en su mayoría presentan canaletas que conducen el agua del techo hacia las calles, pero lo hacen de manera ineficiente, ya que el agua escurre de la canaleta en la parte superior hacia la calle directamente, lo que genera erosión en el suelo; es un hecho que se evidencia en muchas viviendas. Además, que estas canaletas se encuentran en mal estado, debido a su deficiente instalación y diseño por su baja capacidad de conducción de agua.

#### 3.3.4. Calles y avenidas

Las calles y avenidas son de tierra compactada en un 100 %, con veredas en la mayoría de los casos. Presentan casos de erosión, en su mayoría causados por la escorrentía superficial, y otras por la compactación al paso de vehículos.



Figura 17: Calle principal de San Pedro de Larcay después de tormenta.

### 3.3.5. Drenaje pluvial urbano

La cuenca urbana en estudio es la cuenca central de las tres existentes del centro poblado. Se evidenció que no presenta un sistema de drenaje pluvial urbano.

Entre las características principales se observó:

- Existe un canal de regadío que cruza por la parte central de la cuenca, y es el principal colector de las aguas pluviales, que, según manifestación de los pobladores, al haber lluvias muy intensas, superan su capacidad ya que el canal no fue diseñado para drenar aguas pluviales.
- Presenta cunetas circundantes a la plaza de armas que drenan hasta un punto que drena a la carretera.
- Los principales colectores de aguas son las calles y cunetas de tierra existentes realizadas manualmente por los habitantes y se encuentran en mal estado.



Figura 18: Cuneta de San Pedro de Larcay después de tormenta.



Figura 19: Calle de San Pedro de Larcay después de tormenta.

**CAPÍTULO IV: DETERMINACIÓN DE TORMENTAS DE DISEÑO****4.1. RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN**

Se recopiló información de la institución oficial encargada de la medición, recopilación, análisis y distribución de información meteorológica SENAMHI (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología) y también de la ANA (Autoridad Nacional del Agua) con el fin de tener la mayor cantidad de datos de precipitación máxima en 24 horas. La estación de interés fue la estación Paucaray, debido a su cercanía a la zona de estudio; debido a la escasez de datos se realizó la descarga de las dos plataformas mencionadas anteriormente.

Se pudo tener acceso a los registros históricos del SENAMHI y ANA, de manera no oficial, procediendo de la siguiente forma:

- a. En la plataforma del SENAMHI <https://www.gob.pe/senamhi> se ubicó las estaciones pluviométricas, teniendo interés en la estación Paucaray, del cual se descargó los datos de precipitación (mm/día) desde el año 2017 hasta el año 2021, rango que tenía datos.
- b. En la plataforma de la ANA <https://snirh.ana.gob.pe/observatorioSNIRH/> se ubicó las estaciones pluviométricas, con especial interés en la estación Paucaray, se descargó los datos de precipitación acumulada en 12 horas, el cual acumulándolas en 24 horas se obtuvo la precipitación en (mm/día) desde el año 1964 hasta 1981 y 1994 hasta 2018, rangos que tenían datos.

Se realizó la unión de la información de SENAMHI y ANA, teniendo los datos del año 1964 hasta el año 2021 con información faltante en algunos años, con esta se procedió a determinar las precipitaciones máximas (mm/día) por cada mes, correspondiente a cada año; obteniendo la información mostrada en la tabla 12.

Tabla 12: Precipitaciones máximas en 24 horas (mm)

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
1964	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D	17	17
1965	9	9	S/D	8	0	0	4	11	13	8	2	S/D
1966	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D	0	0	0	15	13	10.4
1967	23	25.3	39	13.1	9	0.2	0	21.8	22.7	19.3	6	19.4
1968	39	33	39	24	17.01	30	16	18.6	22.3	33.5	39	30
1969	34.2	36.2	43.1	43.1	30.1	31.1	20.1	26.2	24.2	27	28.1	29.3
1970	34.3	34.2	35	28.1	35.1	21.1	0	21.2	28.1	29.2	28	33
1971	33	29	34	32	6	10	0	14.1	16	15	21	37
1972	27	31.1	42	26	5	0	4	0	64	23	27	27
1973	32	34.1	28	29	24	24	16	15	24.1	6	24	32

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
1974	35.5	29.3	25.6	26.2	11.3	22.4	16.2	23.5	15.8	12.3	25.2	26.3
1975	27.3	26.2	26.1	21.3	12	0	0	0	0	0	0	11.3
1976	31.3	33.5	37.1	35.4	24.3	0	0	20.1	3.9	3.1	5.1	12
1977	0	6.1	31.4	10.2	0	0	0	0	0	10	27.4	23.3
1978	24.2	26	25.2	25.2	0	0	0	0	0	0	0	S/D
1979	20.1	26.3	32	28.4	0	0	0	0	0	0	0	20.1
1980	25.4	23.1	30.1	21.1	0	0	0	21.4	0	43	26	19.5
1981	21.1	34.1	13.2	29	3	0	0	23.3	17.2	S/D	S/D	S/D
1994	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D	7.3
1995	25.9	20.6	18.8	11.5	0	0	0	6.7	21.2	9.3	20	15.3
1996	27.3	S/D	28.5	21	S/D	S/D	0	4.6	17	6.4	9.8	14.6
1997	20.8	S/D	S/D	S/D	0	0	3.5	14.8	13.4	8.6	17	24.4
1998	25.5	15.6	32	15	0	4.9	0	0	8.3	9	9.3	17.6
1999	8.8	23.2	24.5	20.2	5.8	7.2	4.6	0	15.9	20	10.5	22.2
2000	27.6	37	36	9.6	2.6	6.5	14.6	12.1	9	33.2	9.8	18.4
2001	21.7	17.2	20.5	41.4	8.5	1	5.4	14.8	3.9	12.6	11.1	9.9
2002	17.4	28.6	23.4	14.3	2.5	8.9	15.9	7	4.5	6.9	15.8	20.5
2003	27.1	20	18.5	14.6	2.7	0	2.8	11.4	7.4	16.4	9.9	26.4
2004	18.4	25.1	13.9	13.5	2.6	10.4	13.9	9	13.3	10.2	9.4	9.4
2005	21.7	52.6	16.8	21.8	8.4	0	8	S/D	10.2	S/D	7.1	18
2006	37.2	27.9	23.8	23.9	0	6.1	0	17.3	6	16.3	S/D	20.4
2007	21.7	26.5	30	9.3	2.5	0	1.5	2	S/D	15.1	31.9	29.6
2008	20.2	27.8	22.2	13.4	0	4.1	0	0.4	3.9	S/D	6.2	12.3
2009	25.3	33	15	19.8	4.3	0	9	6.6	10	36.2	26.5	12.7
2010	16.1	18.2	15	16.1	4	0	0	6.9	21.7	6.7	11.8	12
2011	39.2	26.5	25.6	20	7.9	3.2	12	9.5	4.9	4.5	14.6	13.7
2012	29.1	38.2	15.8	17	0	16.7	7	1	17.4	11.4	5.8	25.6
2013	24.2	15.9	27.2	9.5	12.7	5.3	6.4	16.8	0	12.4	6.1	18.6
2014	21.2	21.2	22.3	16	9.1	0	9.9	7.2	14	7.6	16.1	20.5
2015	21.3	19.6	23.1	14.2	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D	15.7	10.8	42.1
2016	S/D	15.2	17.8	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D	19
2017	31	36.2	16.8	8.2	7.5	9.8	5.5	3.2	8.8	14.8	16.8	32.5
2018	16.6	29.3	22.5	8.6	1	9.4	10.3	8.2	2	13	11	18.4
2019	22.6	19.8	21.3	8.6	4.8	4.2	12.2	0	7.7	13.6	11.9	26.2
2020	20	25.8	9.8	8.7	S/D	S/D	0	4.3	4.9	29.4	7.2	14.2
2021	38.9	16.2	22	21.6	5.2	4.2	2.1	6.5	4.6	13.5	19.8	25.7
<b>Prom</b>	<b>24.7</b>	<b>27.2</b>	<b>25.7</b>	<b>21.1</b>	<b>8.6</b>	<b>7.6</b>	<b>6.3</b>	<b>9.9</b>	<b>11.9</b>	<b>14.6</b>	<b>14.3</b>	<b>21.4</b>

#### 4.2. COMPLETACIÓN DE INFORMACIÓN FALTANTE

Para completar los datos faltantes, al ser solo una estación se tomó como referencia el método de la Media más Desviación Estándar, obteniendo la tabla 13. Donde se omitió los años 1964, 1966, 1994 y 2016, por falta de datos.

Tabla 13: Precipitaciones máximas mensuales en 24 horas (mm)

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	PMáx 24h
1965	9	9.0	10.9	8.0	0.0	0.0	4.0	11.0	13.0	8.0	2.0	8.0	13.0
1967	23	25.3	39.0	13.1	9.0	0.2	0.0	21.8	22.7	19.3	6.0	19.4	39.0
1968	39	33.0	39.0	24.0	17.0	30.0	16.0	18.6	22.3	33.5	39.0	30.0	39.0
1969	34.2	36.2	43.1	43.1	30.1	31.1	20.1	26.2	24.2	27.0	28.1	29.3	43.1

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	PMáx 24h
1970	34.3	34.2	35.0	28.1	35.1	21.1	0.0	21.2	28.1	29.2	28.0	33.0	35.1
1971	33	29.0	34.0	32.0	6.0	10.0	0.0	14.1	16.0	15.0	21.0	37.0	37.0
1972	27	31.1	42.0	26.0	5.0	0.0	4.0	0.0	64.0	23.0	27.0	27.0	64.0
1973	32	34.1	28.0	29.0	24.0	24.0	16.0	15.0	24.1	6.0	24.0	32.0	34.1
1974	35.5	29.3	25.6	26.2	11.3	22.4	16.2	23.5	15.8	12.3	25.2	26.3	35.5
1975	27.3	26.2	26.1	21.3	12.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	11.3	27.3
1976	31.3	33.5	37.1	35.4	24.3	0.0	0.0	20.1	3.9	3.1	5.1	12.0	37.1
1977	0	6.1	31.4	10.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	10.0	27.4	23.3	31.4
1978	24.2	26.0	25.2	25.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	14.4	26.0
1979	20.1	26.3	32.0	28.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	20.1	32.0
1980	25.4	23.1	30.1	21.1	0.0	0.0	0.0	21.4	0.0	43.0	26.0	19.5	43.0
1981	21.1	34.1	13.2	29.0	3.0	0.0	0.0	23.3	17.2	16.0	13.5	22.8	34.1
1995	25.9	20.6	18.8	11.5	0.0	0.0	0.0	6.7	21.2	9.3	20.0	15.3	25.9
1996	27.3	32.9	28.5	21.0	3.5	0.0	0.0	4.6	17.0	6.4	9.8	14.6	32.9
1997	20.8	26.4	19.2	10.0	0.0	0.0	3.5	14.8	13.4	8.6	17.0	24.4	26.4
1998	25.5	15.6	32.0	15.0	0.0	4.9	0.0	0.0	8.3	9.0	9.3	17.6	32.0
1999	8.8	23.2	24.5	20.2	5.8	7.2	4.6	0.0	15.9	20.0	10.5	22.2	24.5
2000	27.6	37.0	36.0	9.6	2.6	6.5	14.6	12.1	9.0	33.2	9.8	18.4	37.0
2001	21.7	17.2	20.5	41.4	8.5	1.0	5.4	14.8	3.9	12.6	11.1	9.9	41.4
2002	17.4	28.6	23.4	14.3	2.5	8.9	15.9	7.0	4.5	6.9	15.8	20.5	28.6
2003	27.1	20.0	18.5	14.6	2.7	0.0	2.8	11.4	7.4	16.4	9.9	26.4	27.1
2004	18.4	25.1	13.9	13.5	2.6	10.4	13.9	9.0	13.3	10.2	9.4	9.4	25.1
2005	21.7	52.6	16.8	21.8	8.4	0.0	8.0	8.7	10.2	9.3	7.1	18.0	52.6
2006	37.2	27.9	23.8	23.9	0.0	6.1	0.0	17.3	6.0	16.3	14.4	20.4	37.2
2007	21.7	26.5	30.0	9.3	2.5	0.0	1.5	2.0	6.9	15.1	31.9	29.6	31.9
2008	20.2	27.8	22.2	13.4	0.0	4.1	0.0	0.4	3.9	4.1	6.2	12.3	27.8
2009	25.3	33.0	15.0	19.8	4.3	0.0	9.0	6.6	10.0	36.2	26.5	12.7	36.2
2010	16.1	18.2	15.0	16.1	4.0	0.0	0.0	6.9	21.7	6.7	11.8	12.0	21.7
2011	39.2	26.5	25.6	20.0	7.9	3.2	12.0	9.5	4.9	4.5	14.6	13.7	39.2
2012	29.1	38.2	15.8	17.0	0.0	16.7	7.0	1.0	17.4	11.4	5.8	25.6	38.2
2013	24.2	15.9	27.2	9.5	12.7	5.3	6.4	16.8	0.0	12.4	6.1	18.6	27.2
2014	21.2	21.2	22.3	16.0	9.1	0.0	9.9	7.2	14.0	7.6	16.1	20.5	22.3
2015	21.3	19.6	23.1	14.2	3.2	1.7	3.9	9.6	10.3	15.7	10.8	42.1	42.1
2017	31	36.2	16.8	8.2	7.5	9.8	5.5	3.2	8.8	14.8	16.8	32.5	36.2
2018	16.6	29.3	22.5	8.6	1.0	9.4	10.3	8.2	2.0	13.0	11.0	18.4	29.3
2019	22.6	19.8	21.3	8.6	4.8	4.2	12.2	0.0	7.7	13.6	11.9	26.2	26.2
2020	20	25.8	9.8	8.7	0.7	0.4	0.0	4.3	4.9	29.4	7.2	14.2	29.4
2021	38.9	16.2	22.0	21.6	5.2	4.2	2.1	6.5	4.6	13.5	19.8	25.7	38.9

#### 4.3. REGISTRO DE PRECIPITACIÓN MÁXIMA POR AÑO

A partir de la tabla 13 se obtiene las precipitaciones máximas de 24 horas por año, que se detallan en la última columna de esta, y que presenta la siguiente figura:

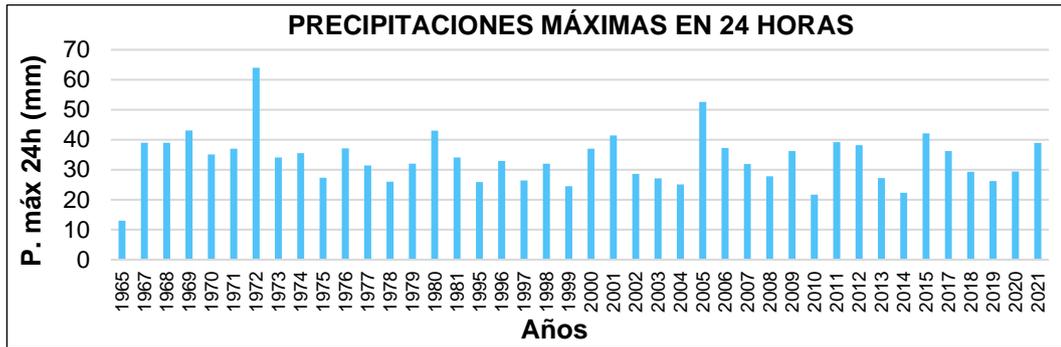


Figura 20: Precipitaciones máximas en 24 horas

#### 4.4. ANÁLISIS DE DATOS DUDOSOS

Para realizar el análisis de datos dudosos de precipitaciones máximas, que tiene como objetivo determinar si las precipitaciones máximas se encuentran dentro de un rango de confianza. Se tomó logaritmo decimal al registro de precipitaciones máximas en 24 horas "y", y también la media " $\bar{y}$ " y desviación estándar " $S_y$ "

Tabla 14: Precipitaciones máximas anuales en 24 horas (mm)

Año	P máx. 24h (mm)	$y=\log(P. \text{ máx.})$
1965	13.0	1.1139
1967	39.0	1.5911
1968	39.0	1.5911
1969	43.1	1.6345
1970	35.1	1.5453
1971	37.0	1.5682
1972	64.0	1.8062
1973	34.1	1.5328
1974	35.5	1.5502
1975	27.3	1.4362
1976	37.1	1.5694
1977	31.4	1.4969
1978	26.0	1.4150
1979	32.0	1.5051
1980	43.0	1.6335
1981	34.1	1.5328
1995	25.9	1.4133
1996	32.9	1.5172
1997	26.4	1.4216
1998	32.0	1.5051
1999	24.5	1.3892
2000	37.0	1.5682
2001	41.4	1.6170
2002	28.6	1.4564
2003	27.1	1.4330
2004	25.1	1.3997
2005	52.6	1.7210
2006	37.2	1.5705
2007	31.9	1.5038
2008	27.8	1.4440

Año	P máx. 24h (mm)	y=log (P. máx.)
2009	36.2	1.5587
2010	21.7	1.3365
2011	39.2	1.5933
2012	38.2	1.5821
2013	27.2	1.4346
2014	22.3	1.3483
2015	42.1	1.6243
2017	36.2	1.5587
2018	29.3	1.4669
2019	26.2	1.4183
2020	29.4	1.4683
2021	38.9	1.5899

$$\bar{y} = 1.5110$$

$$S_y = 0.1152$$

$$N = 42$$

$$K_N = 2.700 \text{ (Para } N=42 \text{ según Chow et al. (1994))}$$

Determinamos los límites de Log Pmáx:

$$y_H = \bar{y} + K_N S_y = 1.822 \quad \text{Límite superior}$$

$$y_L = \bar{y} - K_N S_y = 1.200 \quad \text{Límite inferior}$$

Despejando se obtiene los límites de Pmáx:

$$y_H = \text{Log } P_H \quad \text{entonces,} \quad P_H = 66.4 \text{ mm}$$

$$y_L = \text{Log } P_L \quad \text{entonces,} \quad P_L = 15.8 \text{ mm}$$

Comparando con el registro de precipitaciones máximas en 24 horas, se observa que todo el registro se encuentra incluido dentro de los límites, a excepción de la precipitación del año 1965 que sale del límite inferior, por lo que se toma la decisión de no trabajar con ese año.

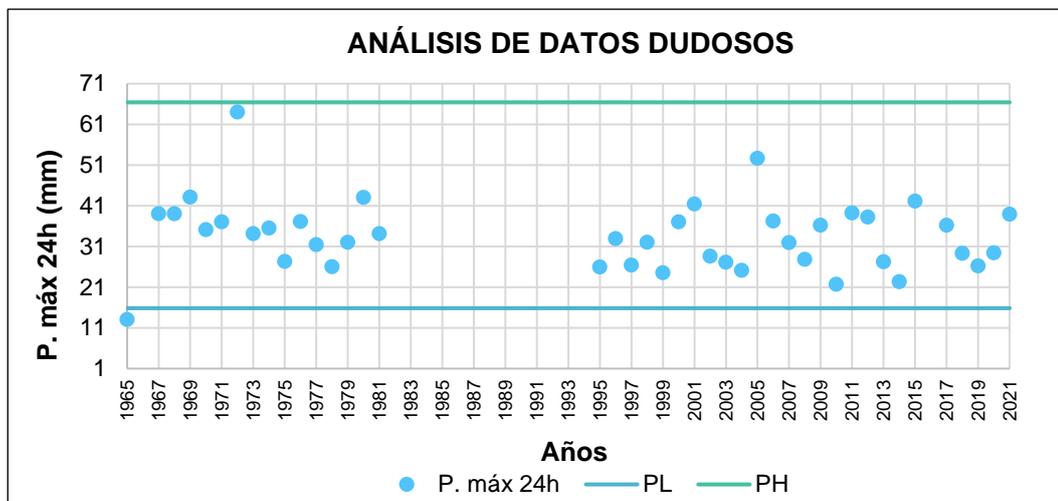


Figura 21: Análisis de datos dudosos

Una vez verificada la información de precipitación, se procedió a determinar las curvas IDF. Se realizó las pruebas de bondad de ajuste a las precipitaciones máximas, para determinar cuál de las distribuciones de probabilidades se ajusta mejor al comportamiento aleatorio de esta variable.

#### 4.5. PRUEBAS DE BONDAD DE AJUSTE

##### 4.5.1. Prueba de Chi-Cuadrado

Una vez realizado los pasos correspondientes a la prueba de bondad de ajuste Chi-Cuadrado (explicada en el Capítulo II), de las cinco distribuciones de probabilidades más comunes se tiene la tabla 15, que presenta los valores estimados de  $Xc^2$ .

Tabla 15: Valores estimados de  $Xc^2$

Función de Distribución	k	Li	Ls	Mc	$\theta_i$	Zi	Zs	Fzi	Fzs	ei	$(\theta_i - e_i)^2 / e_i$
Normal	1	17.47	25.93	21.70	5	-1.958	-0.985	0.025	0.162	5.626	0.07
	2	25.93	34.39	30.16	17	-0.985	-0.012	0.162	0.495	13.651	0.82
	3	34.39	42.85	38.62	15	-0.012	0.961	0.495	0.832	13.797	0.10
	4	42.85	51.31	47.08	2	0.961	1.934	0.832	0.973	5.809	2.50
	5	51.31	59.77	55.54	1	1.934	2.907	0.973	0.998	1.013	0.00
	6	59.77	68.23	64.00	1	2.907	3.880	0.998	1.000	0.073	11.85
										$Xc^2 =$	<b>15.34</b>
Log Normal	1	2.97	3.19	3.08	2	-2.347	-1.380	0.009	0.084	3.049	0.36
	2	3.19	3.40	3.29	13	-1.380	-0.413	0.084	0.340	10.499	0.60
	3	3.40	3.62	3.51	15	-0.413	0.554	0.340	0.710	15.186	0.00
	4	3.62	3.83	3.73	9	0.554	1.521	0.710	0.936	9.250	0.01
	5	3.83	4.05	3.94	1	1.521	2.488	0.936	0.994	2.365	0.79
	6	4.05	4.27	4.16	1	2.488	3.455	0.994	1.000	0.252	2.22
										$Xc^2 =$	<b>3.97</b>
Gumbel	1	17.47	25.93	21.70	5			0.004	0.167	6.670	0.42
	2	25.93	34.39	30.16	17			0.167	0.555	15.919	0.07
	3	34.39	42.85	38.62	15			0.555	0.824	11.025	1.43
	4	42.85	51.31	47.08	2			0.824	0.938	4.684	1.54
	5	51.31	59.77	55.54	1			0.938	0.979	1.677	0.27
	6	59.77	68.23	64.00	1			0.979	0.993	0.567	0.33
										$Xc^2 =$	<b>4.07</b>
Pearson III	1	17.47	25.93	21.70	5	-1.958	-0.985	-0.277	0.159	17.884	9.28
	2	25.93	34.39	30.16	17	-0.985	-0.012	0.159	0.569	16.786	0.00
	3	34.39	42.85	38.62	15	-0.012	0.961	0.569	0.841	11.144	1.33
	4	42.85	51.31	47.08	2	0.961	1.934	0.841	0.945	4.296	1.23
	5	51.31	59.77	55.54	1	1.934	2.907	0.945	0.984	1.571	0.21
	6	59.77	68.23	64.00	1	2.907	3.880	0.984	0.995	0.487	0.54
										$Xc^2 =$	<b>12.59</b>
Log Pearson III	1	2.97	3.19	3.08	2	-2.347	-1.380	-0.147	0.134	11.495	7.84
	2	3.19	3.40	3.29	13	-1.380	-0.413	0.134	0.414	11.495	0.20
	3	3.40	3.62	3.51	15	-0.413	0.554	0.414	0.722	12.627	0.45
	4	3.62	3.83	3.73	9	0.554	1.521	0.722	0.918	8.033	0.12
	5	3.83	4.05	3.94	1	1.521	2.488	0.918	0.982	2.630	1.01
	6	4.05	4.27	4.16	1	2.488	3.455	0.982	0.998	0.655	0.18
										$Xc^2 =$	<b>9.80</b>

Seleccionando un nivel de significancia de  $\alpha = 5\%$ , se tiene los siguientes valores teóricos  $Xt^2$  de la tabla 4 de distribución de Chi-Cuadrado:

- Para función de dos parámetros  $h = 2$  (Funciones Normal, Log Normal y Gumbel) y  $\alpha = 5\%$ , se tiene:  $Xt^2 = 7.81$
- Para función de dos parámetros  $h = 3$  (Funciones Pearson III, Log Pearson III) y  $\alpha = 5\%$ , se tiene:  $Xt^2 = 5.99$

Comparando con los valores estimados y teóricos, se aceptarían las funciones Log Normal y Gumbel, ya que los valores teóricos son mayores a los estimados. Para decidir entre las funciones aceptadas se comparan sus respectivos valores de  $Xc^2$ , con lo que la función Log Normal es la que mejor se ajusta a los datos por tener menor valor estimado.

#### 4.5.2. Prueba de Kolmogorov-Smirnov

Una vez realizado los pasos correspondientes a la prueba de bondad de ajuste Kolmogorov-Smirnov (explicado en el Capítulo II), de las cinco distribuciones de probabilidades más comunes se tiene la tabla 16.

Tabla 16: Valores estimados de  $\Delta c$

m	Función de distribución		Normal		Log Normal		Gumbel		Pearson III		Log Pearson III	
	P máx. 24h	P(P)	F(Z)	$\Delta c$	F(Z)	$\Delta c$	F(Z)	$\Delta c$	F(Z)	$\Delta c$	F(Z)	$\Delta c$
1	64.00	0.976	1.000	0.024	0.998	0.022	0.991	0.015	0.999	0.023	0.995	0.018
2	52.60	0.952	0.988	0.036	0.980	0.027	0.958	0.005	0.966	0.013	0.969	0.016
3	43.10	0.929	0.866	0.062	0.878	0.051	0.849	<b>0.079</b>	0.863	0.066	0.869	0.059
4	43.00	0.905	0.864	0.041	0.875	0.029	0.847	0.057	0.861	0.044	0.867	0.038
5	42.10	0.881	0.838	0.043	0.855	0.026	0.829	0.052	0.843	0.038	0.848	0.032
6	41.40	0.857	0.816	0.041	0.838	0.020	0.813	0.044	0.829	0.028	0.834	0.024
7	39.20	0.833	0.737	<b>0.097</b>	0.771	0.062	0.755	0.079	0.772	0.061	0.775	0.058
8	39.00	0.810	0.729	0.081	0.764	0.045	0.749	0.061	0.764	0.045	0.767	0.042
9	39.00	0.786	0.729	0.057	0.764	0.022	0.749	0.037	0.764	0.021	0.767	0.019
10	38.90	0.762	0.724	0.037	0.761	0.001	0.746	0.016	0.760	0.002	0.763	0.001
11	38.20	0.738	0.695	0.043	0.735	0.003	0.723	0.015	0.733	0.005	0.736	0.002
12	37.20	0.714	0.651	0.063	0.695	0.019	0.689	0.025	0.693	0.021	0.696	0.018
13	37.10	0.690	0.647	0.044	0.691	0.000	0.686	0.005	0.689	0.001	0.692	0.001
14	37.00	0.667	0.642	0.025	0.686	0.020	0.682	0.015	0.685	0.019	0.688	0.021
15	37.00	0.643	0.642	0.001	0.686	0.044	0.682	0.039	0.685	0.042	0.688	0.045
16	36.20	0.619	0.605	0.014	0.651	0.032	0.652	0.033	0.654	0.035	0.655	0.036
17	36.20	0.595	0.605	0.010	0.651	0.056	0.652	0.056	0.654	0.058	0.655	0.059
18	35.50	0.571	0.572	0.000	0.619	0.047	0.624	0.052	0.626	0.055	0.625	0.054
19	35.10	0.548	0.552	0.005	0.599	0.052	0.607	0.059	0.610	0.063	0.608	0.060
20	34.10	0.524	0.504	0.020	0.549	0.025	0.563	0.039	0.571	0.047	0.564	0.041
21	34.10	0.500	0.504	0.004	0.549	0.049	0.563	0.063	0.571	0.071	0.564	0.064
22	32.90	0.476	0.445	0.031	0.486	0.010	0.507	0.031	0.523	0.047	0.510	0.034
23	32.00	0.452	0.402	0.050	0.437	0.015	0.463	0.011	0.484	0.032	0.477	0.024
24	32.00	0.429	0.402	0.026	0.437	0.008	0.463	0.034	0.484	0.056	0.430	0.001
25	31.90	0.405	0.398	0.007	0.431	0.027	0.458	0.053	0.479	<b>0.074</b>	0.424	0.020

Función de distribución			Normal		Log Normal		Gumbel		Pearson III		Log Pearson III	
m	P máx. 24h	P(P)	F(Z)	$\Delta c$	F(Z)	$\Delta c$	F(Z)	$\Delta c$	F(Z)	$\Delta c$	F(Z)	$\Delta c$
26	31.40	0.381	0.374	0.007	0.404	0.023	0.433	0.052	0.454	0.073	0.399	0.018
27	29.40	0.357	0.286	0.071	0.296	0.061	0.330	0.027	0.352	0.006	0.291	0.066
28	29.30	0.333	0.282	0.052	0.291	0.042	0.325	0.008	0.346	0.013	0.286	0.047
29	28.60	0.310	0.254	0.056	0.255	0.054	0.290	0.020	0.311	0.001	0.247	0.063
30	27.80	0.286	0.223	0.062	0.217	<b>0.069</b>	0.250	0.036	0.270	0.016	0.200	0.085
31	27.30	0.262	0.205	0.056	0.194	0.068	0.226	0.036	0.244	0.018	0.171	0.091
32	27.20	0.238	0.202	0.036	0.189	0.049	0.222	0.016	0.239	0.001	0.165	0.073
33	27.10	0.214	0.199	0.016	0.185	0.029	0.217	0.003	0.234	0.020	0.159	0.056
34	26.40	0.190	0.176	0.015	0.156	0.035	0.185	0.005	0.198	0.008	0.116	0.074
35	26.20	0.167	0.169	0.003	0.148	0.019	0.177	0.010	0.188	0.021	0.104	0.063
36	26.00	0.143	0.163	0.020	0.140	0.003	0.168	0.025	0.178	0.035	0.091	0.052
37	25.90	0.119	0.160	0.041	0.136	0.017	0.164	0.045	0.173	0.054	0.085	0.034
38	25.10	0.095	0.138	0.042	0.108	0.013	0.133	0.037	0.132	0.037	0.034	0.061
39	24.50	0.071	0.122	0.051	0.089	0.018	0.111	0.040	0.101	0.030	-0.006	0.077
40	22.30	0.048	0.076	0.028	0.039	0.009	0.050	0.003	-0.011	0.059	-0.159	0.207
41	21.70	0.024	0.066	0.042	0.030	0.006	0.039	0.015	-0.042	0.066	-0.203	<b>0.227</b>

De la tabla 5, seleccionando un nivel de significancia de  $\alpha = 5\%$ , se tiene el valor teórico de  $\Delta t$ .

– Para  $N = 41$  y  $\alpha = 5\%$ , se tiene:  $\Delta t = 1.36/\sqrt{N} = 0.2124$

Comparando con los valores estimados y teóricos, se aceptan todas las funciones a excepción de Log Pearson III. Para decidir entre las funciones aceptadas se comparan sus respectivos valores de  $\Delta c$ , con lo que la función Log Normal es la que tiene menor valor de  $\Delta c$ , por lo que esta distribución se ajusta mejor a los datos analizados.

#### 4.6. DETERMINACIÓN DE CURVAS IDF

Aplicando la fórmula de Dyck y Peschke, ecuación (24), se estimó la precipitación (mm), para diferentes duraciones de lluvia. Obteniendo la tabla 17.

Tabla 17: Precipitaciones en (mm), para distintas duraciones

Año	P máx. 24h (mm)	Duración en minutos (d)					
		5	10	20	30	60	120
1967	39.0	9.5	11.3	13.4	14.8	17.6	21.0
1968	39.0	9.5	11.3	13.4	14.8	17.6	21.0
1969	43.1	10.5	12.4	14.8	16.4	19.5	23.2
1970	35.1	8.5	10.1	12.0	13.3	15.9	18.9
1971	37.0	9.0	10.7	12.7	14.1	16.7	19.9
1972	64.0	15.5	18.5	22.0	24.3	28.9	34.4
1973	34.1	8.3	9.8	11.7	13.0	15.4	18.3
1974	35.5	8.6	10.2	12.2	13.5	16.0	19.1
1975	27.3	6.6	7.9	9.4	10.4	12.3	14.7
1976	37.1	9.0	10.7	12.7	14.1	16.8	19.9
1977	31.4	7.6	9.1	10.8	11.9	14.2	16.9
1978	26.0	6.3	7.5	8.9	9.9	11.7	14.0
1979	32.0	7.8	9.2	11.0	12.2	14.5	17.2
1980	43.0	10.4	12.4	14.8	16.3	19.4	23.1

Año	P máx. 24h (mm)	Duración en minutos (d)					
		5	10	20	30	60	120
1981	34.1	8.3	9.8	11.7	13.0	15.4	18.3
1995	25.9	6.3	7.5	8.9	9.8	11.7	13.9
1996	32.9	8.0	9.5	11.3	12.5	14.9	17.7
1997	26.4	6.4	7.6	9.1	10.0	11.9	14.2
1998	32.0	7.8	9.2	11.0	12.2	14.5	17.2
1999	24.5	5.9	7.1	8.4	9.3	11.1	13.2
2000	37.0	9.0	10.7	12.7	14.1	16.7	19.9
2001	41.4	10.0	12.0	14.2	15.7	18.7	22.2
2002	28.6	6.9	8.3	9.8	10.9	12.9	15.4
2003	27.1	6.6	7.8	9.3	10.3	12.2	14.6
2004	25.1	6.1	7.2	8.6	9.5	11.3	13.5
2005	52.6	12.8	15.2	18.1	20.0	23.8	28.3
2006	37.2	9.0	10.7	12.8	14.1	16.8	20.0
2007	31.9	7.7	9.2	11.0	12.1	14.4	17.1
2008	27.8	6.7	8.0	9.5	10.6	12.6	14.9
2009	36.2	8.8	10.5	12.4	13.8	16.4	19.4
2010	21.7	5.3	6.3	7.4	8.2	9.8	11.7
2011	39.2	9.5	11.3	13.5	14.9	17.7	21.1
2012	38.2	9.3	11.0	13.1	14.5	17.3	20.5
2013	27.2	6.6	7.9	9.3	10.3	12.3	14.6
2014	22.3	5.4	6.4	7.7	8.5	10.1	12.0
2015	42.1	10.2	12.2	14.5	16.0	19.0	22.6
2017	36.2	8.8	10.5	12.4	13.8	16.4	19.4
2018	29.3	7.1	8.5	10.1	11.1	13.2	15.7
2019	26.2	6.4	7.6	9.0	10.0	11.8	14.1
2020	29.4	7.1	8.5	10.1	11.2	13.3	15.8
2021	38.9	9.4	11.2	13.4	14.8	17.6	20.9

Luego se procedió a calcular las intensidades mediante la siguiente expresión. Obteniéndose la tabla 18.

$$I = \frac{P_d}{\left(\frac{d}{60}\right)} \quad (40)$$

Tabla 18: Intensidades en (mm/h), para distintas duraciones

Año	Duración en minutos (d)					
	5	10	20	30	60	120
1967	113.6	67.5	40.2	29.6	17.6	10.5
1968	113.6	67.5	40.2	29.6	17.6	10.5
1969	125.5	74.7	44.4	32.7	19.5	11.6
1970	102.2	60.8	36.1	26.7	15.9	9.4
1971	107.8	64.1	38.1	28.1	16.7	9.9
1972	186.4	110.9	65.9	48.6	28.9	17.2
1973	99.3	59.1	35.1	25.9	15.4	9.2
1974	103.4	61.5	36.6	27.0	16.0	9.5
1975	79.5	47.3	28.1	20.7	12.3	7.3
1976	108.1	64.3	38.2	28.2	16.8	10.0
1977	91.5	54.4	32.3	23.9	14.2	8.4
1978	75.7	45.0	26.8	19.8	11.7	7.0
1979	93.2	55.4	33.0	24.3	14.5	8.6
1980	125.3	74.5	44.3	32.7	19.4	11.6
1981	99.3	59.1	35.1	25.9	15.4	9.2
1995	75.4	44.9	26.7	19.7	11.7	7.0

Año	Duración en minutos (d)					
	5	10	20	30	60	120
1996	95.8	57.0	33.9	25.0	14.9	8.8
1997	76.9	45.7	27.2	20.1	11.9	7.1
1998	93.2	55.4	33.0	24.3	14.5	8.6
1999	71.4	42.4	25.2	18.6	11.1	6.6
2000	107.8	64.1	38.1	28.1	16.7	9.9
2001	120.6	71.7	42.6	31.5	18.7	11.1
2002	83.3	49.5	29.5	21.7	12.9	7.7
2003	78.9	46.9	27.9	20.6	12.2	7.3
2004	73.1	43.5	25.9	19.1	11.3	6.7
2005	153.2	91.1	54.2	40.0	23.8	14.1
2006	108.4	64.4	38.3	28.3	16.8	10.0
2007	92.9	55.3	32.9	24.2	14.4	8.6
2008	81.0	48.2	28.6	21.1	12.6	7.5
2009	105.4	62.7	37.3	27.5	16.4	9.7
2010	63.2	37.6	22.3	16.5	9.8	5.8
2011	114.2	67.9	40.4	29.8	17.7	10.5
2012	111.3	66.2	39.3	29.0	17.3	10.3
2013	79.2	47.1	28.0	20.7	12.3	7.3
2014	65.0	38.6	23.0	16.9	10.1	6.0
2015	122.6	72.9	43.4	32.0	19.0	11.3
2017	105.4	62.7	37.3	27.5	16.4	9.7
2018	85.3	50.7	30.2	22.3	13.2	7.9
2019	76.3	45.4	27.0	19.9	11.8	7.0
2020	85.6	50.9	30.3	22.3	13.3	7.9
2021	113.3	67.4	40.1	29.6	17.6	10.5

Aplicando la prueba de bondad de ajuste al registro de precipitaciones máximas en 24 horas, se determinó que la distribución de probabilidad Log-Normal se ajusta mejor al comportamiento aleatorio de esta variable. Con esta distribución se procedió a calcular las intensidades para cada duración y para los periodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 30 y 50 años.

Tabla 19: Intensidades en (mm/h) para distintos periodos de retorno

Periodo de retorno en años (T)	Duración en minutos (d)					
	5	10	20	30	60	120
2	96.6	57.4	34.2	25.2	15.0	8.9
5	116.8	69.4	41.3	30.5	18.1	10.8
10	129.0	76.7	45.6	33.6	20.0	11.9
25	143.3	85.2	50.7	37.4	22.2	13.2
30	146.0	86.8	51.6	38.1	22.7	13.5
50	153.5	91.2	54.3	40.0	23.8	14.2

Con esta información se determinó la ecuación (25) que relaciona estas variables.

Ordenando la información en la tabla 20, se aplica una regresión línea múltiple para determinar las constantes características de la zona de estudio.

Tabla 20: Intensidades, frecuencias y duraciones con logaritmos

I	T	d	Y	X1	X2
			Ln(I)	Ln(T)	Ln(d)
96.6	2	5	4.57	0.69	1.61
116.8	5	5	4.76	1.61	1.61
129.0	10	5	4.86	2.30	1.61
143.3	25	5	4.97	3.22	1.61
146.0	30	5	4.98	3.40	1.61
153.5	50	5	5.03	3.91	1.61
57.4	2	10	4.05	0.69	2.30
69.4	5	10	4.24	1.61	2.30
76.7	10	10	4.34	2.30	2.30
85.2	25	10	4.45	3.22	2.30
86.8	30	10	4.46	3.40	2.30
91.2	50	10	4.51	3.91	2.30
34.2	2	20	3.53	0.69	3.00
41.3	5	20	3.72	1.61	3.00
45.6	10	20	3.82	2.30	3.00
50.7	25	20	3.93	3.22	3.00
51.6	30	20	3.94	3.40	3.00
54.3	50	20	3.99	3.91	3.00
25.2	2	30	3.23	0.69	3.40
30.5	5	30	3.42	1.61	3.40
33.6	10	30	3.52	2.30	3.40
37.4	25	30	3.62	3.22	3.40
38.1	30	30	3.64	3.40	3.40
40.0	50	30	3.69	3.91	3.40
15.0	2	60	2.71	0.69	4.09
18.1	5	60	2.90	1.61	4.09
20.0	10	60	3.00	2.30	4.09
22.2	25	60	3.10	3.22	4.09
22.7	30	60	3.12	3.40	4.09
23.8	50	60	3.17	3.91	4.09
8.9	2	120	2.19	0.69	4.79
10.8	5	120	2.38	1.61	4.79
11.9	10	120	2.48	2.30	4.79
13.2	25	120	2.58	3.22	4.79
13.5	30	120	2.60	3.40	4.79
14.2	50	120	2.65	3.91	4.79

Procediendo de la manera indicada en las ecuaciones (2.26) y (2.27) del marco teórico, se obtuvo:

$$a_0 = 5.714 \quad a_1 = 0.141 \quad a_2 = -0.75$$

Entonces:

$$K = 303.171 \quad m = 0.141 \quad n = 0.75$$

Finalmente, se determinó la ecuación de las curvas IDF.

$$I = \frac{303.171 * T^{0.141}}{d^{0.75}} \quad (41)$$

A partir de esta ecuación, se determinaron las curvas IDF mostradas en la figura 22, para periodos de retorno 2, 5 y 10 años.

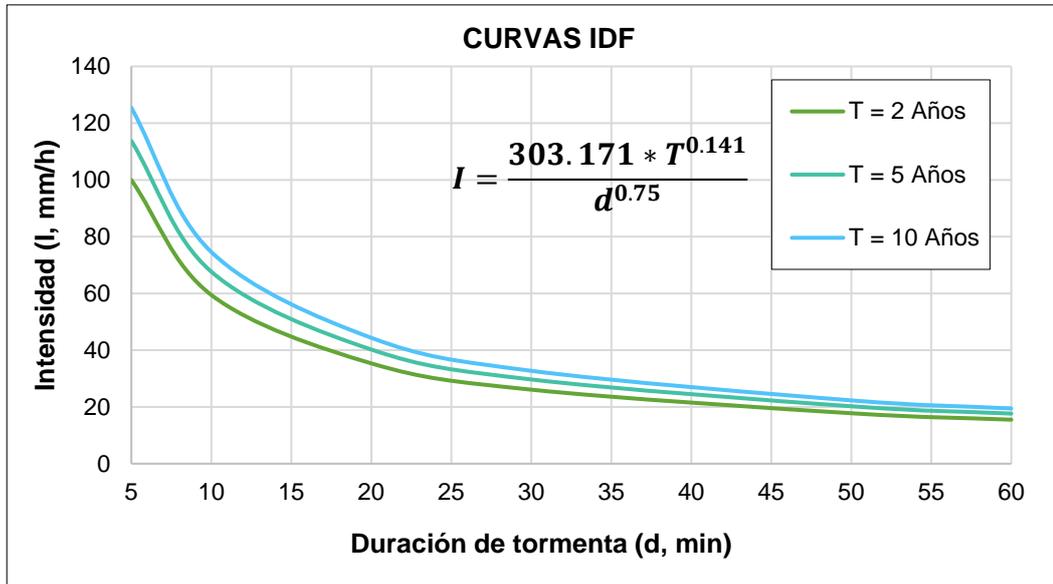


Figura 22: Curvas IDF.

Si bien es cierto que existen curvas IDF proporcionadas por el SENAMHI, estas solo muestran información para duraciones de tormenta a partir de 60 minutos en adelante. Al ser revisadas, las intensidades para los periodos de retorno de 2, 5 y 10 años están alrededor de 15 mm/h y 20 mm/h; valores muy similares a los obtenidos con las curvas IDF elaboradas.

## CAPÍTULO V: DISEÑO Y ENSAYO DEL SIMULADOR DE LLUVIAS

### 5.1. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE TRABAJO

#### 5.1.1. Laboratorio Nacional de Hidráulica

El Laboratorio Nacional de Hidráulica (LNH) es un centro de investigación de recursos hídricos fundado en 1960 y ubicado en la Universidad Nacional de Ingeniería, en Lima. Su objetivo principal es el estudio de los recursos hídricos mediante la realización de estudios a escala con modelos hidráulicos, el desarrollo de investigaciones en mecánica de fluidos y la ejecución de pruebas de laboratorio con fines didácticos.



Figura 23: Laboratorio Nacional de Hidráulica.

El LNH facilitó al autor de esta tesis el módulo de simulador de lluvia construido por el tesista Roberto Cáceres Izquierdo en el 2008 con la finalidad de realizar un estudio sobre la pérdida de suelos. Este módulo experimental consta de una bomba de 1 hp, tuberías de distribución de PVC, y un sistema estructural de la plataforma que será detallados más adelante.



Figura 24: Modelo de simulador de lluvia del LNH

EL módulo ocupa un área de 80 m<sup>2</sup>. Se ubicó cerca del edificio de la División Didáctica debido a la cercanía a las líneas de conducción de agua.

### 5.2. DESCRIPCIÓN DEL SIMULADOR DE LLUVIAS

El simulador de lluvias recrea intensidades de diseño sobre los techos verdes y techos convencionales, para estudiar su comportamiento; en específico los hidrogramas de salida luego del evento recreado. El simulador está construido sobre el soporte estructural del modelo de simulador de lluvia existente del LNH. Este está construido en un área aproximada de 18 m<sup>2</sup> y consta de diversos elementos cuya descripción se desarrolla en las siguientes secciones de este capítulo.

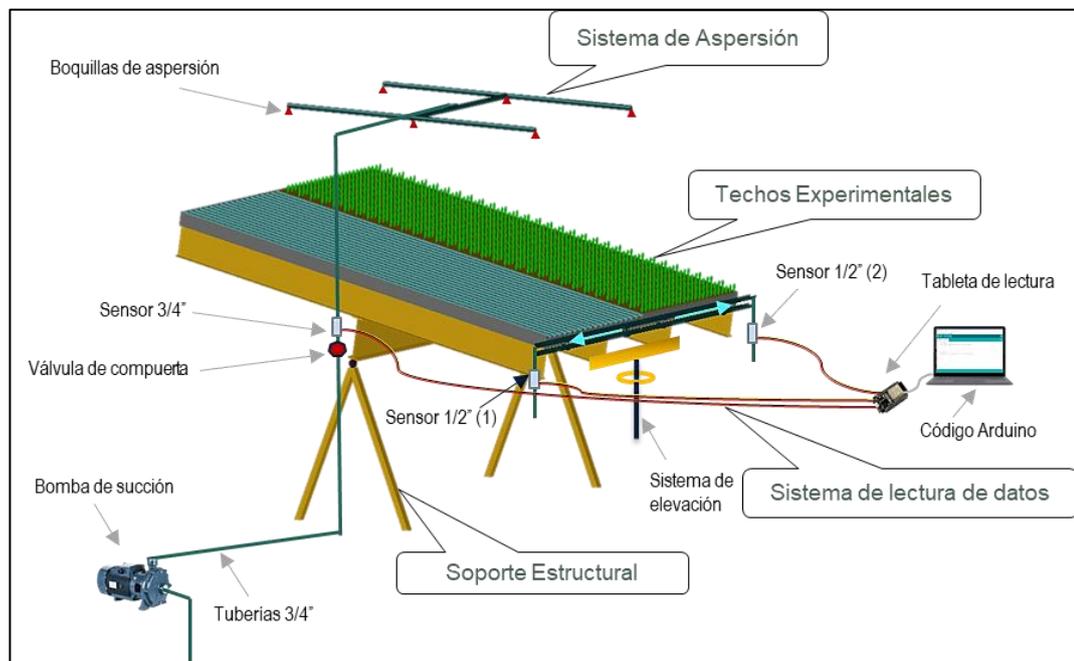


Figura 25: Elementos del modelo experimental.

### 5.3. SOPORTE ESTRUCTURAL

El soporte estructural del simulador de lluvia del LNH, se encuentra en óptimas condiciones. Su diseño estructural ha sido ejecutado por el tesista Roberto Cáceres Izquierdo respetando las pautas establecidas por el *American Institute of Steel Construction* y de la NTE E.090 de Estructuras Metálicas. Todos los elementos fueron construidos en acero A36 con resistencia  $f_y=2530 \text{ kg/cm}^2$  producido por la empresa Aceros Arequipa (Cáceres, 2008).



Figura 26: Soporte estructural del modelo experimental.

### 5.3.1. Subestructura

De acuerdo con Cáceres (2008), la subestructura está compuesta por las cimentaciones y los tijerales. Las cimentaciones son 4 zapatas de 0.6 m x 0.60 m x 0.4 m de concreto de 175 kg/cm<sup>2</sup>, estas fueron vaciadas incorporando en el interior de cada una dos pernos de anclaje de 5/8" de diámetro y de 15 cm de longitud, siendo un total de ocho pernos que tuvieron la finalidad de fijar los tijerales.

Los tijerales son dos y están conformados de estructuras cuadradas de 7.5 cm de lado y 4.3 mm de espesor y constituyen la estructura de soporte del sistema similar

a un caballete; estos elementos han sido diseñados considerando los requerimientos de flexión, compresión y torsión simultáneos

### 5.3.2. Superestructura

La superestructura de acuerdo con Cáceres (2008) está compuesta por la viga principal, vigas secundarias, viguetas y planchas de fibrocemento. La viga principal es una viga W 16X31 de una longitud de 3.86 m, con rigidizadores cada 1.29 m; este elemento se fija por los extremos de la subestructura, sobre las barras de ojo que contienen al eje de giro del sistema y fue diseñado bajo el requerimiento de flexión.

Las vigas secundarias fueron construidas en números de cuatro, están apoyadas sobre la viga principal; consisten en vigas W 12X14 de 4.8 m de longitud que fueron diseñadas por flexión, se encuentran apoyadas aproximadamente al centro de la viga principal y en los extremos gracias a apoyos mecánicos.

Las viguetas son canales C 2X1X2 mm de 1.22 m de longitud cada uno; se encuentran soldadas por los extremos a las vigas secundarias, siendo perpendiculares a estas, distanciadas entre ellas 0.66 m, siendo un total de treinta y seis; el requerimiento de diseño es de flexión y tienen como finalidad servir de apoyo a las planchas de fibrocemento, reduciendo su luz de flexión y evitando su falla, así como rigidizar el total de la superestructura.

Las planchas de fibrocemento fueron instaladas para soportar directamente el peso del estrato de suelo. En número de seis, fueron fijadas a las viguetas C2X1X2 mm y sus dimensiones son 1.22 m X 2.44 m.

Así la plataforma experimental está compuesta en la base por planchas de fibrocemento y una caja de fibrocemento como un encofrado experimental de una altura de 35 cm, la plataforma tiene un área de 17.71 m<sup>2</sup>, en esta se implementó los techos experimentales.

### 5.3.3. Sistema de Elevación

El uso del modelo de simulación de lluvias a diferentes pendientes requiere de un sistema de elevación confiable, rápido y sobre todo seguro; por ende (Cáceres, 2008) usó dos tornillos sujetos a un vástago diseñado para resistir una carga de compresión de 8 toneladas, siendo su requerimiento máximo de sólo 2 toneladas, por lo que se puede decir que ha sido sobredimensionado. Sin embargo, este sistema fue cambiado en el año 2019, por el tesista Walter Vilcapoma Ocaña, que

implementó un sistema de elevación que permite ampliar los límites de cambio de pendiente, pudiendo alcanzar pendientes de hasta 50 %.

#### 5.4. TECHOS EXPERIMENTALES

Los techos experimentales fueron instalados sobre la plataforma de fibrocemento de área 17.71 m<sup>2</sup>, los cuales fueron de dos tipos: una mitad de techo verde y otra de techo convencional cada una con un área de 8.85 m<sup>2</sup> (1.86 m x 4.76 m), separados por un límite central de 20 cm de altura.

##### 5.4.1. Techo Verde (TV)

###### 5.4.1.1. Consideraciones generales para el diseño

Los techos verdes en este trabajo se plantean con la finalidad de estudiar su influencia sobre la escorrentía en el drenaje pluvial urbano, dando un enfoque especial en la contribución que tiene estos sistemas como técnicas de gestión de aguas pluviales.

A continuación, se realiza un análisis de las condiciones generales de diseño de los techos verdes para la zona de estudio planteada. Los techos verdes planteados son para las viviendas del centro poblado San Pedro de Larcay.

- Condición estructural

Según la caracterización de la zona se identificó que la mayoría de las viviendas están construidas con adobe y los techos son de calamina, como material principal. Debido a que el techo debe ser liviano para este tipo de estructuras, se plantea que el techo verde sea lo menos pesado posible y funcional.

- Mantenimiento

Debido a que los techos en la zona de estudio son de acceso restringido, se requiere que los techos verdes a instalar sean de bajo mantenimiento.

- Drenaje sostenible

En la zona de estudio se presentan inundaciones y daños por erosión a las calles de la zona. Por ende, es fundamental que el techo verde a instalar sea un sistema urbano de drenaje sostenible.

- Condiciones climáticas

Como se describió en la caracterización climática de la zona de estudio se presentan condiciones climáticas extremas como sequías, inundaciones y heladas, para lo cual la vegetación a elegir debe ser capaz de soportar estas condiciones.

- Irrigación

Las precipitaciones en la zona de estudio según el estudio hidrológico son de manera estacional, donde solo cuatro meses presentan lluvias intensas, y los otros meses son de lluvias bajas o escasas; debido a ello se debe tomar en consideración que el tipo de vegetación a elegir debe soportar estas condiciones críticas.

- Pendiente de techo

Según la caracterización de la zona de estudio, las pendientes características de los techos oscilan entre 10 % (5.71°) a 20 % (11.31°), por lo que, para este estudio, se analizará para pendientes de 10, 15 y 20%.

Mediante las condiciones descritas anteriormente el tipo de techo verde que se ajusta a los requerimientos de acuerdo con la tabla 9, son los techos verdes extensivos:

Tabla 21: Características de los tipos de techos verdes extensivos.

CARACTERÍSTICAS	TECHO VERDE EXTENSIVO
Mantenimiento	Bajo
Plantas	Musgos, Sedum, Hierbas y Pastos
Riego	Bajo
Accesibilidad	Bajo
Espesor de sustrato	5 – 15 cm
Carga estructural	60 – 150 kg/cm <sup>2</sup>
Costo	Bajo
Gestión de agua pluvial	Bajo

Además, un sistema extensivo de techo verde se usa comúnmente en situaciones donde no se desea un soporte estructural adicional, esto minimiza la demanda

estructural del techo. Además, están diseñados para ser accesibles de forma regular para el mantenimiento.

#### 5.4.1.2. Componentes de los Techos Verdes extensivos

El techo verde extensivo instalado se compone de una capa impermeable con barrera de raíces, una capa de drenaje y filtro, una capa de sustrato de crecimiento y una capa de vegetación.

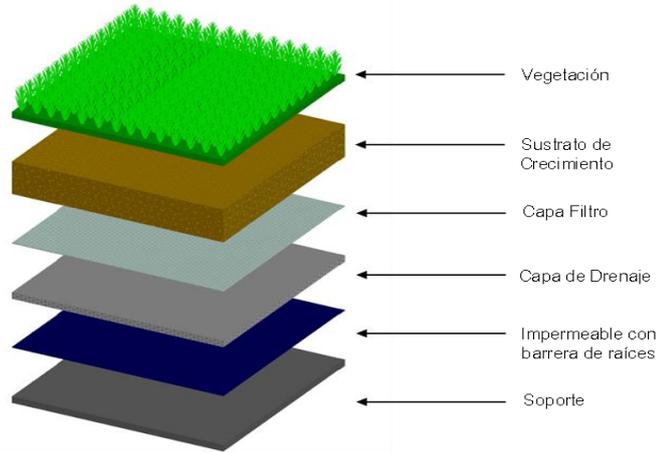


Figura 27: Componentes de techos verdes extensivos (Vijayaraghavan, 2016)

- Capa de Vegetación

Las alternativas de vegetación surgen de la caracterización climática y física de la zona de estudio, siendo las mejores opciones las plantas nativas: pasto Kikuyo (*Pennisetum clandestinum*), pasto Poa nigricanis (*Eragrostis nigricans*) y plantas recomendadas para los techos verdes como el sedum y suculentas que cumplan las condiciones generales de la zona, estas tres opciones serán comparadas mediante ciertos criterios para elegir la más adecuada, como se muestra a continuación:

Tabla 22: Criterios para la selección de plantas.

CRITERIOS	ÓPTIMO (Para la zona de estudio)	PASTO ( <i>Pennisetum clandestinum</i> )	PASTO ( <i>Eragrostis nigricans</i> )	SUCULENTA ( <i>Aptenia Cordifolia</i> )
Expectativa de vida	Alto	Alto	Alto	Alto
Resistencia a condiciones climáticas	Alto	Medio	Medio	Alto
Aspecto Visual	Alto	Alto	Alto	Alto
Propagación	Bajo	Alto	Bajo	Bajo
Profundidad de raíces	Bajo	Alto	Medio	Bajo

CRITERIOS	ÓPTIMO (Para la zona de estudio)	PASTO ( <i>Pennisetum clandestinum</i> )	PASTO ( <i>Eragrostis nigricans</i> )	SUCULENTA ( <i>Aptenia Cordifolia</i> )
Necesidad de nutrientes	Bajo	Medio	Bajo	Bajo
Necesidad de riego	Bajo	Medio	Medio	Bajo
Mantenimiento	Bajo	Alto	Medio	Bajo

Del cuadro comparativo, la mejor opción viene a ser la planta suculenta (*Aptenia Cordifolia*), ya que cumple mejor las características requeridas para los techos verdes extensivos que se plantean para la zona de estudio. Y se tiene la certeza de que puede crecer bajo las condiciones dadas en la zona de estudio y en la zona de experimentación.

Así, la capa de vegetación implementada en el modelo experimental está compuesta por un total de 96 plantas suculentas (*Aptenia Cordifolia*) distribuidas en la plataforma (1.86 m x 4.76 m) de manera equidistante. Se trasplantó las plantas dos meses antes de realizar los ensayos para que el suelo se consolide y para contar con una cobertura vegetal adecuada para retener parte de la lluvia y resistir la erosión del suelo. Además, se implementó una franja de agregados con el fin de filtrar y drenar de manera adecuada la escorrentía superficial.

Adicionalmente se instaló una zona libre de vegetación, que tiene como objetivo facilitar el drenaje de la escorrentía. Esta franja tuvo un espesor de 20 cm con una profundidad igual al del sustrato de crecimiento; y estuvo compuesto de canto rodado de diámetro de 2" (50 mm) en promedio.



Figura 28: Capa de vegetación, Planta suculenta *Aptenia Cordifolia*

- Sustrato de crecimiento

El sustrato de crecimiento fue diseñado con el fin de tener el menor grosor posible para evitar una sobrecarga excesiva en el techo, pero que a la vez retenga la mayor cantidad de agua posible para una gestión adecuada de la cantidad de agua pluvial.

En el diseño del sustrato de crecimiento se definió el espesor, composición y distribución de partículas; según recomendaciones de normas y guías técnicas. Según la FLL (2018) el espesor del sustrato de crecimiento se define según la vegetación utilizada en el techo verde, y este se determina del tipo de cobertura y del tipo de especie que se va a emplear y se puede extraer de la siguiente figura.

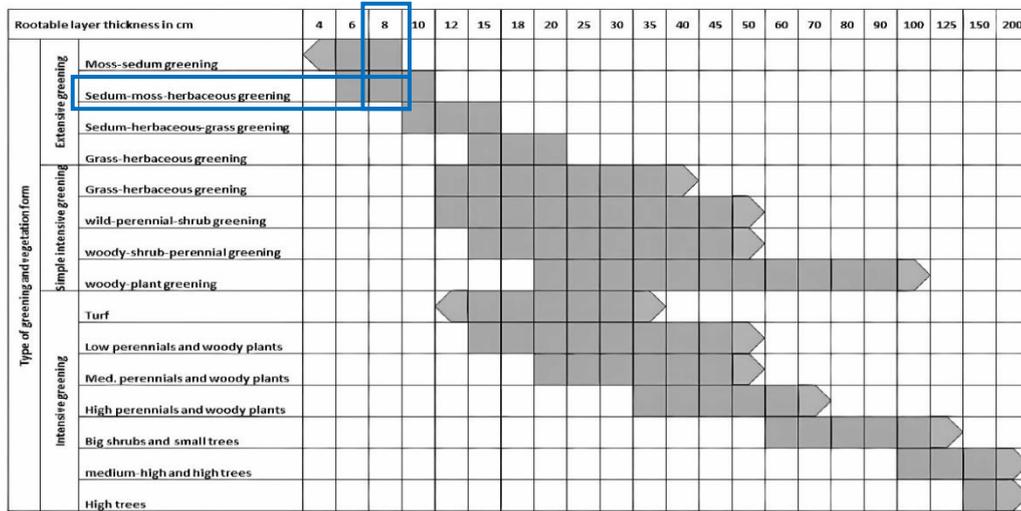


Figura 29: Espesor de sustrato en función de tipo de vegetacion

Fuente: (FLL, 2018)

El espesor del sustrato planteado fue de 8 cm, tomando en consideración que es un techo verde extensivo y la vegetación es una planta suculenta. Su composición es un 50 % de tierra de cultivo, 30 % de cascarilla de arroz semi compuesta, 10 % de compost y 10 % de arena fina lavada; de color marrón oscuro, de descomposición semi lenta, compactación ligera, capacidad de retención de líquidos media y un peso aproximado de 846 Kg por metro cúbico. Se implementó un espesor de 8 cm, lo que permite ser ligero, y funciona como medio de nutriente suficiente para la vegetación. Los detalles técnicos del sustrato de crecimiento se detallan en el Anexo B. Ficha técnica sustrato de crecimiento.



Figura 30: Sustrato de crecimiento de techo verde extensivo.

- Capa de drenaje y filtro

La capa de drenaje tiene el propósito de eliminar el exceso de agua del techo y mantener las condiciones aeróbicas en el medio vegetal del techo. El rendimiento de esta capa fue determinado en función de la siguiente ecuación según la FLL (2018):

$$q' = \frac{A \times C_s \times q}{b} \quad (42)$$

Donde,  $q'$  es el Volumen de descarga en  $l/(s \times m)$  en el curso de drenaje,  $A$  es el área de la superficie a ser drenada en  $m^2$ ,  $C_s$  es el valor de referencia de escorrentía (pico),  $q$  es la lluvia de diseño en  $l/(s \times m^2)$  y  $b$  es el ancho de drenaje calculado en  $m$ .

Los valores de la tabla 23, pueden ser tomados como valores referenciales de coeficientes de escorrentía  $C_s$ , dependiendo del espesor del sustrato y la inclinación del techo (FLL, 2018).

Tabla 23: Valores de referencia de escorrentía.

Espesor de la capa de sustrato	Pendiente del techo hasta 5°	Pendiente del techo mayor a 5°
Mayor a 50cm	$C_s = 0.1$	-
Entre 25 – 50 cm	$C_s = 0.2$	-
Entre 15 – 25 cm	$C_s = 0.3$	-
Entre 10 – 15 cm	$C_s = 0.4$	$C_s = 0.5$
Entre 6 – 10 cm	$C_s = 0.5$	$C_s = 0.6$

Fuente: (FLL, 2018)

Para el modelo experimental se tiene los siguientes valores:

$$A = 1.86 \times 4.76 = 8.85 \text{ m}^2$$

$$C_s = 0.6 \text{ (de la tabla 23)}$$

$q = 0.0207 \text{ l}/(\text{s} \times \text{m}^2)$  para la lluvia más intensa de 74.6 mm/h

$b = 1.86 \text{ m}$

Reemplazando estos valores en la ecuación (42):

$$q' = \frac{8.85 \times 0.6 \times 0.0207}{1.86}$$

$$q' = 0.06 \text{ l}/(\text{s} \times \text{m})$$

$$q' = 0.06 \text{ l}/(\text{s} \times \text{m})$$

El rendimiento de drenaje de la capa de drenaje debe ser  $0.06 \text{ l}/(\text{s} \times \text{m})$ . Valor fundamental en la decisión de la elección de la capa drenante.

El material elegido como capa drenante y filtro fue el Geodren Planar, implementado sobre la capa impermeable. Este material es la unión de un geotextil no tejido y una red drenante (Pavco Wavin, 2021).

El geotextil no tejido que cumple la función de capa de filtro tiene un tamaño de apertura aparente de 0.180 mm, permitividad de  $2.9 \text{ s}^{-1}$ , un valor de permeabilidad de  $46 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$ , y tasa de flujo de  $8109 \text{ l}/\text{min}/\text{m}^2$ . La red drenante que cumple la función de capa de drenaje tiene un espesor de 5.8 mm, resistencia a la compresión de 700 KPa y resistencia a la tensión de 4.8 KN/m.

Cabe mencionar que el Geodren Planar instalado tiene una capacidad de drenar hasta  $0.21 \text{ l}/\text{sxm}$  para una presión de 10 KPa con gradiente hidráulico de 0.1, valor que es superior a la capacidad calculada de  $0.06 \text{ l}/\text{sxm}$ , por lo que se considera aceptable y adecuada. Los detalles técnicos del Geodren Planar se muestran en el Anexo C. Ficha técnica geodren planar.



Figura 31: Capa de drenaje y filtro, Geodren Planar

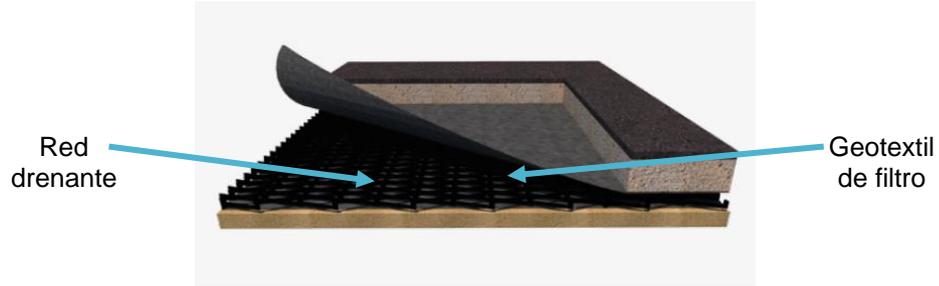


Figura 32: Componentes del Geodren Planar

Fuente: (Pavco Wavin, 2021)

- Capa impermeable con barrera de raíces

La capa impermeable que tiene el propósito mantener libre de humedad y paso de agua al soporte estructural y además como barrera de raíces, fue instalado de manera tal que cubrió toda la plataforma experimental y cierta altura del fibrocemento lateral, para garantizar la impermeabilización del techo. El material usado en esta capa fue una geomembrana de HDPE de 1 mm que cumple la función de impermeabilizar y además como barrera de penetración de raíces; su instalación se observa en la siguiente figura y sus propiedades se detallan en el Anexo D. Ficha técnica geomembrana HDPE 1 mm.



Figura 33: Capa impermeable anti-raíces, Geomembrana HDPE de 1 mm.

#### 5.4.2. Techo Convencional (TC)

El techo convencional está constituido de forma similar a los techos convencionales de calamina que son construidos en las viviendas de la ciudad altoandina en estudio. Este sistema en el modelo experimental está compuesto por una capa impermeable, soportes de madera y calaminas galvanizadas. Las componentes se presentan de manera esquemática en la Figura 34 y el diseño de la instalación del techo convencional se presenta en la Figura 35.

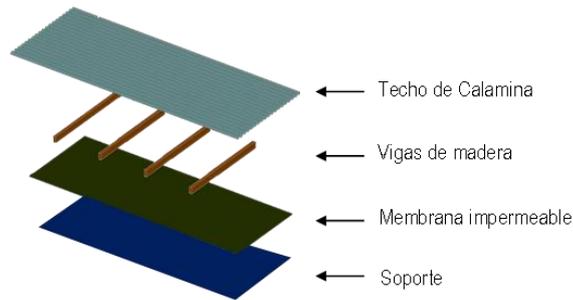


Figura 34: Componentes del Techo Convencional.

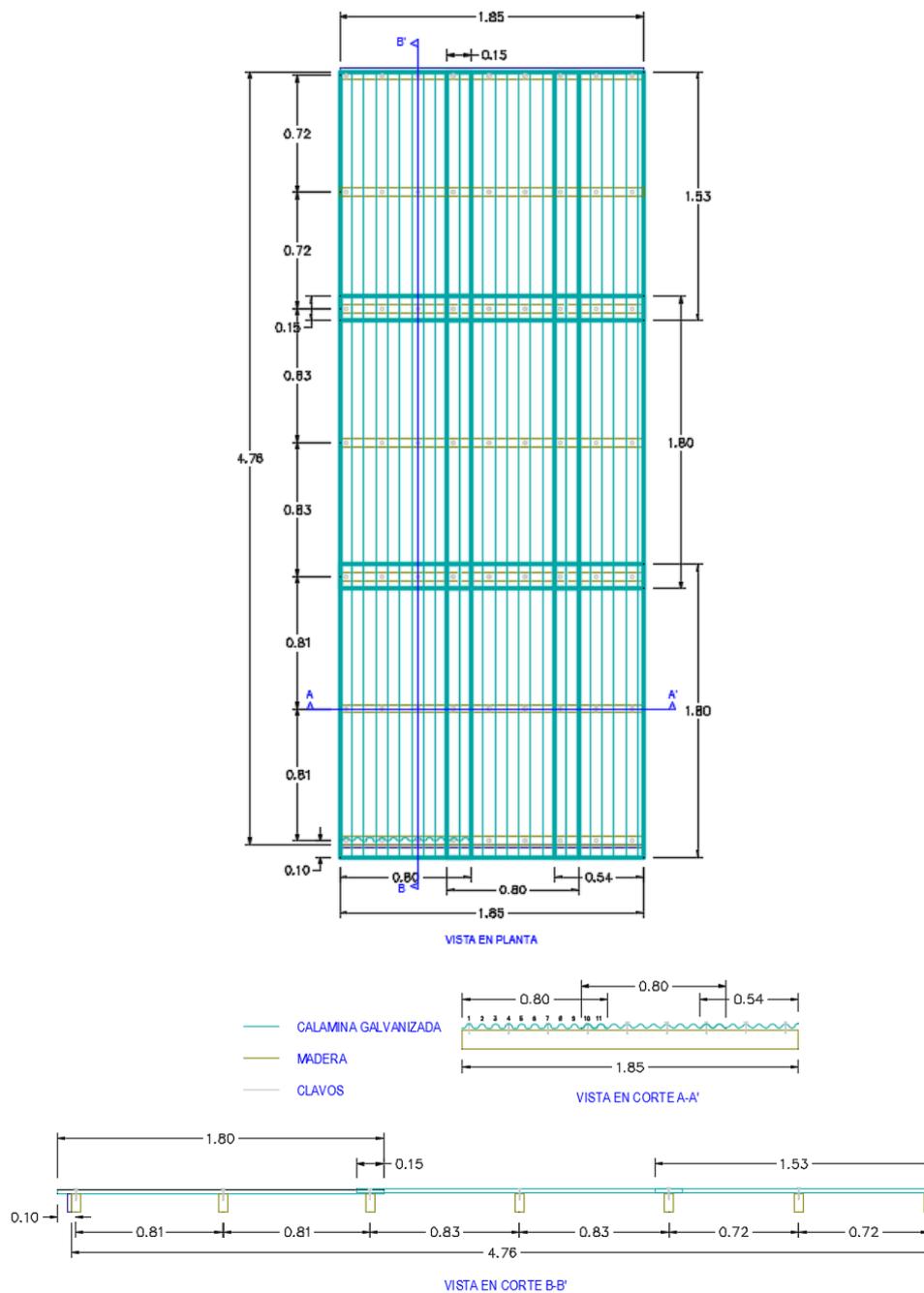


Figura 35: Configuración de Techo Convencional, dimensiones en metros

- Calamina galvanizada

Las calaminas galvanizadas utilizadas tienen una dimensión de 1.80 m de largo y 0.80 m de ancho con un número de ondas 11; se usaron un total de 9 unidades para cubrir el área de estudio con traslape lateral de 2 ondas y un traslape longitudinal de 15 cm.



Figura 36: Techo de Calamina galvanizada.

- Soportes de madera

Los soportes de madera están ubicados cada 0.81 m para una buena retención de las calaminas, y estas son sujetadas mediante clavos con capuchones en la parte alta de la onda, para la protección ante el paso del agua. Las maderas usadas son del tipo pino radiata de 2"x4"x1.85 m y se usó un total de 7 unidades.



Figura 37: Vigas de madera

- Capa impermeable

La capa impermeable tiene la función de recolectar el agua que pasa por los traslapes de la calamina, para que el flujo que se filtra pueda ser medido; el material usado fue la Geomembrana de HDPE de 1 mm, como se muestra en la siguiente figura.



Figura 38: Capa impermeable, Membrana de HDPE de 1 mm.

#### 5.4.3. Desagüe

Se implementó canaletas de desagüe tanto a los techos convencionales y techos verdes. Estas canaletas fueron de dos niveles, uno superior para el agua de escorrentía superficial y otro inferior para el agua infiltrada. Estas canaletas fueron de PVC de sección semicircular de radio de 4"; cada una de estas, en la parte de la salida, están conectadas mediante reductores a tuberías de 1/2" donde se encuentran ubicados los sensores de flujo, que miden los caudales que pasan por cada una de las tuberías. Se usaron solamente dos sensores, para el TC se usó de la canaleta del nivel superior y para el Techo verde (TV) de la canaleta del nivel inferior; los otros dos restantes tenían poca agua por lo que solo se midió volúmenes.



Figura 39: Canaletas de desagües

## 5.5. SISTEMA DE ASPERSIÓN DE LLUVIAS

El diseño hidráulico del sistema de aspersión está en función a los requerimientos que debe cumplir este; con el fin de recrear de manera óptima las intensidades de lluvias a ensayar.

Las intensidades de precipitaciones a recrear son las obtenidas del estudio hidrológico de la zona de estudio, la ciudad rural de San Pedro de Larcay; se obtuvieron de las curvas IDF que representan las intensidades de precipitaciones para distintos periodos de retorno y duraciones.

Las tormentas de diseño a tomar en consideración para ser recreadas en el simulador de lluvia corresponden a los periodos de retorno de 2, 5 y 10 años, periodos de retorno usados para el diseño de drenaje pluvial urbano, como recomendación de la norma peruana CE.040 Drenaje Pluvial (MVCS, 2021). Además, para una duración (igual al tiempo de concentración) de tormenta de 10 minutos, tiempo mínimo para drenaje pluvial.

Tabla 24: Tormentas de diseño a ser recreadas en (mm/h)

Periodo de retorno (Años)	Intensidades para duración de 10 minutos (mm/h)
2	59.4
5	67.6
10	74.6

### 5.5.1. Boquillas de aspersión

El área para simular es de 17.71 m<sup>2</sup>, para lo cual se determinará el caudal total aproximado a utilizar para simular cada una de las intensidades de precipitación seleccionando la mayor intensidad de 74.6 mm/h se procede a transformar en caudal (l/s), mediante la siguiente ecuación:

$$Q = \frac{IA}{3600} \quad (43)$$

Donde,  $Q$  es el caudal en (l/s),  $I$  es la intensidad en (mm/h) y  $A$  es el área en (m<sup>2</sup>).

Del cual se obtiene el caudal máximo requerido 0.367 l/s que debe circular por las boquillas de aspersión; correspondiente a la intensidad máxima de precipitación de 74.6 mm/h.

En base a esto cada una de las 6 boquillas a elegir deben tener la capacidad de conducir la sexta parte de cada uno de estos caudales, es decir deben conducir 0.0612 l/s (0.97 gal/min).

Para cumplir este requerimiento se usarán boquillas FullJet ¼ HH-14WSQ de la empresa norteamericana *Spraying Systems*, la capacidad de estas boquillas están medidas en galones por minutos; se usarán boquillas aspersion, que a 10 psi tiene una capacidad de caudal de 1.4 gal/min, cumpliéndose el mínimo requerido; los detalles técnicos de las boquillas de aspersion se muestran en el Anexo E. Especificaciones de boquilla de aspersion FullJet ¼ HH-14WSQ.



Figura 40: Boquillas de aspersion FullJet ¼ HH-14WSQ

La distribución de las boquillas de aspersion es simétrica, con el fin de que mojen toda la plataforma, donde se ubican los techos convencionales.



Figura 41: Distribución de boquillas de aspersion

### 5.5.2. Tuberías

El método utilizado para determinar el diámetro de tuberías en función del caudal que se requiere transportar fue la fórmula adaptada de Brese.

$$d = 15.5 \times \sqrt{Q} \quad (44)$$

Donde,  $d$  es el diámetro en (mm) y  $Q$  es el caudal en (m<sup>3</sup>/h)

Entonces, para un caudal de 0.367 l/s (correspondiente a una intensidad de 74.6 mm/h), se obtiene un diámetro mínimo de 0.73 cm, seleccionando tuberías de ¾" (1.9 cm).

Además, se debe tener en cuenta que la velocidad admisible de ser aproximadamente de 2 m/s, con lo que para un diámetro de ¾" y caudal de 0.367 l/s se tiene una velocidad de 1.29 m/s, lo cual es aceptable.

### 5.5.3. Bomba de succión

Para abastecer el simulador de lluvias se captó agua de la cisterna del LNH, mediante una bomba de succión. La potencia necesaria de la bomba se calculó en base al sistema de aspersión planteado y la presión necesaria de 10 psi para el funcionamiento adecuado de las boquillas de aspersión. A continuación, se detalla el esquema del sistema de aspersión del simulador de lluvias.

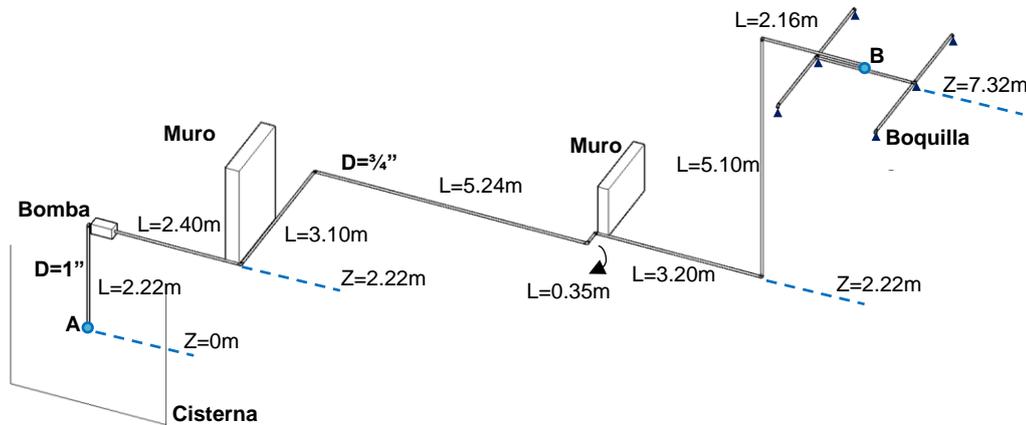


Figura 42: Esquema del sistema de aspersión

Se aplica la ecuación de Energía (Ecuación de Bernoulli) en los puntos A y B:

$$E_A = E_B \quad (45)$$

$$\frac{V_A^2}{2g} + \frac{P_A}{\gamma} + Z_A + \frac{Pot}{\gamma Q} = \frac{V_B^2}{2g} + \frac{P_B}{\gamma} + Z_B + h_{A-B} \quad (46)$$

Del cual, para una presión de 10 psi en los aspersores, es necesario una potencia de bomba de 0.09 HP, por lo que una bomba de 1 HP es suficiente para el adecuado funcionamiento del sistema como se determinó en el Anexo F. Cálculo de potencia de bomba de succión.



Figura 43: Bomba de succión.

#### 5.5.4. Accesorios

El principal accesorio es la válvula de compuerta ubicada en la tubería de impulsión que permite regular el caudal que pasa sobre este, y de esta manera controlar el caudal requerido.



Figura 44: Válvula de compuerta

Además, se usaron diversos accesorios que se detallan en la tabla 25, así como también los materiales del diseño final del sistema de aspersores o simulador de lluvia.

Tabla 25. Materiales usados en el sistema de aspersión

Materiales	Descripción	Unidad	Cantidad
BOMBA DE SUCCIÓN	Potencia de 1HP	und	1
TUBO	Diámetro de 1"	ml	2.2
ACCESORIOS (1")	Niple 5 cm de 1"	und	5
	Codo rosca 90° de 1"	und	1
	Adaptador rosca/liso de 1"	und	1
	Tee rosca de 1"	und	1
	Llave de compuerta de 1"	und	1
	Reductor liso de 1" a 3/4"	und	1
TUBO	Diámetro de 3/4"	ml	29.8
ACCESORIOS (3/4")	Universal liso de 3/4"	und	2
	Codo liso 90° de 3/4"	und	6
	Tee liso de 3/4"	und	1
	Tee rosca de 3/4"	und	4
	Llave compuerta de 3/4"	und	1
	Adaptador rosca/liso de 3/4"	und	16
	Válvula de compuerta de 3/4"	und	1
	Llave compuerta 3/4"	und	1
	Unión rosca de 3/4"	und	2
	Codo Mixto 90° 3/4"	und	5
	Niple 5 cm de 3/4"	und	3
	Reductor liso de 3/4" a 1/4"	und	6
BOQUILLAS DE ASPERSIÓN	FullJet 1/4HH – WSQ14	und	6

## 5.6. SISTEMA DE LECTURA DE DATOS

### 5.6.1. Sensores de Flujo

Lo sensores de flujo miden los caudales por medio de un código Arduino. El sensor de flujo a utilizar debe ser capaz de conducir el caudal máximo que pasa por el sistema del simulador de lluvia, este valor corresponde a la mayor intensidad.

Por lo tanto, para medir el flujo que pasa después de la válvula de compuerta para un caudal de 0.367 l/s (22 l/min) se optó por un sensor de flujo de 3/4" de diámetro que tiene la capacidad de conducir un flujo de 1 a 60 l/min. Y para los caudales que salen por las canaletas al ser valores de inferiores a 0.184 l/s (11 l/min) serán necesarios sensores de flujo de 1/2" de diámetro que tienen la capacidad de conducir un flujo de 1 a 30 l/min.



Figura 45: Sensor de flujo de 1/2"

#### 5.6.1.1. Calibración de los sensores de flujo:

La calibración de los sensores de flujo consiste en calcular los factores de conversión que pasa de frecuencia de pulso a caudal de agua, este factor se obtiene a partir de una muestra de medidas, donde la variable que se puede medir con exactitud es la cantidad de pulsos mediante el Arduino, y con ayuda de un recipiente con graduación se puede medir la cantidad o volumen de agua. Estas dos variables se pueden medir con buena exactitud para calcular el factor de conversión con estas dos variables se puede utilizar la ecuación (38):

$$K = \frac{N^{\circ}pulsos}{Volumen \times 60}$$

Las muestras medidas fueron cercanas a las que circularan por los sensores. Los valores del factor de conversión se muestran en resumen en la tabla 26. Las medidas tomadas se muestran en el Anexo G. Factores de conversión K para sensores de flujo.

Tabla 26: Factores de conversión K para sensores de flujo

Sensor de Flujo	Ubicación	Factor de conversión K
3/4"	Tubería de impulsión después de la válvula de compuerta	6.21
1/2" (1)	Canaleta de desagüe en el Nivel superior del TC	6.76
1/2" (2)	Canaleta de desagüe en el Nivel inferior del TV	6.89

### 5.6.2. Código de Arduino

El uso del código Arduino junto con una placa de desarrollo ESP32 facilita la lectura de los valores de caudal detectados por los sensores de flujo, expresados en litros por minuto. La placa de desarrollo ESP32, un microcontrolador, ejecuta las instrucciones del programa Arduino y se comunica con el entorno físico a través de los sensores de flujo, proporcionando información de caudal según lo programado en los códigos Arduino adjuntos en el Anexo H. Códigos Arduino.



Figura 46: Placa de desarrollo ESP32 y código Arduino

Se usó dos códigos, el primero para la calibración de los sensores flujo y el segundo para la medición de caudales con los parámetros obtenidos de la calibración de sensores. Los códigos Arduino para la calibración de los sensores de flujo y para la lectura de caudales de los ensayos se muestran en el Anexo H. Códigos Arduino.

## 5.7. CALIBRACIÓN Y OPERACIÓN DEL SIMULADOR DE LLUVIAS

### 5.7.1. Calibración del simulador de lluvia

La calibración del simulador de lluvia consistió en corroborar que las lluvias generadas se aproximen a las lluvias naturales que se requieren simular. Para ello se tomó en cuenta tres características importantes de las lluvias naturales, como se detalla en el estudio realizado por Arone et al., (2023a):

#### 5.7.1.1. Intensidad de precipitación

La calibración de la intensidad consistió en determinar el adecuado giro de válvula de compuerta que genere las intensidades de precipitación de diseño que se muestran en la tabla 24, tormentas de diseño a ser recreadas.

Si bien el caudal aplicado por las boquillas es registrado por el sensor de flujo de 3/4", que a la vez es controlado por el giro de válvula de compuerta; en los ensayos se observó que solo un porcentaje del caudal impulsado llega a la plataforma, por lo que la calibración se dio con el caudal que llega netamente a la plataforma. Este caudal fue medido mediante los sensores de 1/2" (1) y 1/2" (2) ubicados en cada mitad del techo experimental que solo tenía la geomembrana impermeable lo cual recolectó toda el agua que caía netamente en el techo. El caudal suma de los dos sensores convertido en intensidad en función del área representa la intensidad a calibrar.



Figura 47: Configuración de plataforma para calibrar la intensidad

#### 5.7.1.2. Distribución de uniformidad

Este parámetro mide que tan distribuida espacialmente está la lluvia sobre la plataforma, y se estima utilizando el coeficiente de uniformidad de Christiansen ( $C_u$ ) como se presenta en la ecuación (37) (Kim et al. 2018).

$$C_u = \left( 1 - \frac{\sum_{i=1}^n |x_i - \bar{x}|}{n\bar{x}} \right) \times 100\%$$

Donde  $x_i$  es la cantidad de lluvia en la ubicación  $i$ ,  $\bar{x}$  es la cantidad media de lluvia y  $n$  es el número total de observaciones.

Cuanto más se acerque el valor al 100 %, más uniforme será la distribución espacial de las lluvias. Para parcelas experimentales grandes, un valor de (Cu) del 70 % se considera razonablemente aceptable (Kim et al. 2018).

La determinación del (Cu) se realizó para las intensidades calibradas, este parámetro se determinó de manera experimental mediante recipientes distribuidos cada 0.35 cm de separación, como se muestra en la siguiente figura. Estos recipientes fueron recolectores de agua de la intensidad de lluvia por 10 minutos. Se usaron un total de 252 recipientes en toda la plataforma de estudio.



Figura 48: Distribución de recipientes para determinar el Cu

### 5.7.1.3. Tamaño de gotas

El tamaño de gotas simulada debe ser cercana a las gotas de las lluvias naturales, en la tabla 27 de Roth (2003) se aprecia la clasificación de la lluvia en función del diámetro de gotas.

Tabla 27: Clasificación de la lluvia en función del diámetro de las gotas.

Tipo de Precipitación	Diámetro (mm)
Llovizna	0.06 – 0.6
Lluvia	1.0 – 3.0
Aguacero o Chubasco	4.0 – 6.0

Fuente: (Roth, 2003)

El tamaño de gotas se puede determinar usando la ecuación de Ngasoh et al. (2020):

$$D = \sqrt[3]{\left(\frac{6}{\pi}\right)W} \quad (47)$$

Donde,  $D_r$  es diámetro promedio de la gota de lluvia (mm),  $W$  es la masa de gránulos (mg).

Además, se puede determinar mediante la ecuación Luengas y De La Rosa (2015):

$$D_r = 13.18 \times m^{0.34} \quad (48)$$

Donde,  $D_r$  es diámetro de la gota de lluvia (mm),  $m$  es la masa de gránulos (gr).

Para determinar el tamaño de gotas se utilizó el método de Gránulos de Harina, que consiste en posicionar bandejas de harina dentro del rango de cobertura de precipitación del simulador de lluvia durante 5 segundos, como se muestra en la figura 49. Una vez secado los gránulos de harina se determina su masa, para luego determinar su diámetro según las ecuaciones ya mencionadas. Para determinar el tamaño de gotas promedio, se tomaron 50 muestras de gránulos de harina para cada una de las intensidades.



Figura 49: Gránulos de harina formados luego de precipitación

## 5.8. ENSAYOS REALIZADOS Y RECOPIACION DE DATOS

El funcionamiento del modelo experimental inicia con el encendido de la bomba, seguido del giro adecuada de válvula de compuerta para la intensidad que se desea simular y también se mide y ubica la pendiente de la plataforma, luego se

enciende la bomba de succión. Una vez prendida la bomba se toma el tiempo de duración de la intensidad de precipitación y, de manera simultánea se miden los valores de caudal de salida en los sensores de flujo de 1/2" correspondiente a cada techo TC y TV, caudales que luego son analizados en hidrogramas.

En base al funcionamiento del modelo experimental se realizó ensayos para las tres intensidades de precipitación correspondientes a los tres periodos de retorno planteado y además para las tres pendientes de techo para duraciones de 10 minutos, con un total de 9 ensayos, como se describe a continuación y se detalló en el estudio elaborado por Arone et al., (2023b).

Tabla 28: Escenarios de ensayos para TV y TC

Ensayo	Periodo de Retorno (años)	Intensidad (mm/h)	Pendiente (%)
1	2	59.4	10
2			15
3			20
4	5	67.6	10
5			15
6			20
7	10	74.6	10
8			15
9			20

## CAPÍTULO VI: MODELAMIENTO DEL DRENAJE EN HEC-RAS 2D

Con el fin de determinar las áreas de inundación, tirantes y velocidades del agua pluvial en la cuenca urbana, así como también hidrogramas de escorrentía aguas abajo de la cuenca urbana de la zona de estudio se utilizó el software de modelamiento HEC-RAS 2D con el uso de la herramienta Ras-Mapper. Para ello se procedió como se describe a continuación.

### 6.1. DELIMITACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

La zona de estudio está conformada por una subcuenca urbana del centro poblado San Pedro de Larca y como se presenta en la figura 50. Se caracteriza por presentar la mayor cantidad de viviendas del centro poblado. Además, que presenta en la parte central un canal de riego, que cuando se presentan precipitaciones intensas, funciona como principal estructura de aguas pluviales.

La delimitación de la cuenca urbana se realizó mediante el análisis de las pendientes principales y divisoras de agua de la cuenca urbana; tomando como referencia la topografía levantada con done y el mapa de flujos que se muestra en el Anexo I. Mapa de sentido de flujo de agua.

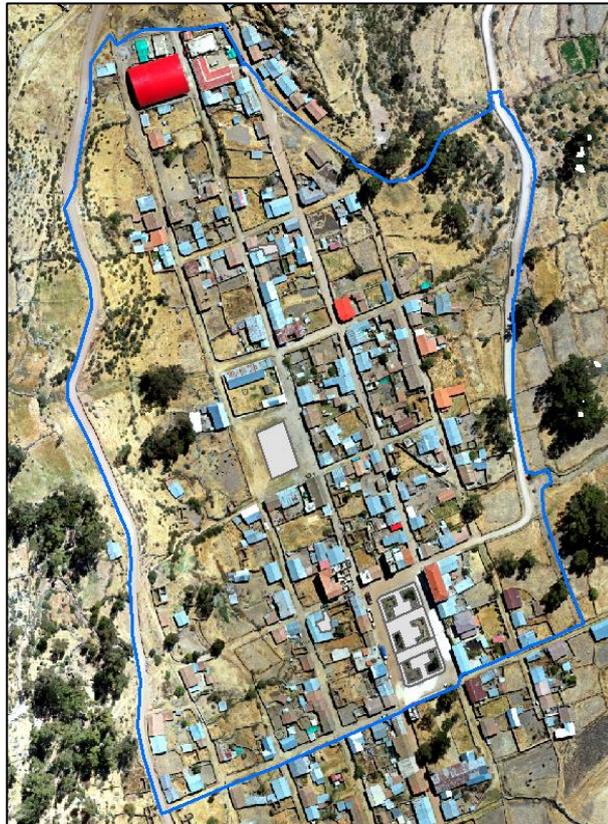


Figura 50: Límite del área de estudio

La configuración para el modelamiento inicia con la configuración del terreno, configuración de la geometría, ingreso de condiciones de borde y corrida del programa.

## 6.2. CONFIGURACIÓN DEL TERRENO

### 6.2.1.1. Información Topográfica

El modelamiento del área de estudio inicia con la importación en HEC-RAS 2D del archivo con información topográfica en formato TIFF o TIN, que esta referenciada en el sistema de proyección UTM 18S y Datum WGS84, el cual posee una resolución espacial de 0.5 metros. Luego en HEC-RAS 2D fue sometida a un refinamiento de 0.3 metros para generar mallas que estén por encima de este valor y menores a 0.5 metros. Además, se cuenta con una ortofoto (imagen de alta resolución obtenida del vuelo de dron) que se usó como referencia para delimitar los componentes de la geometría, y los tipos de uso de suelo.

### 6.2.1.2. Ajustes de Terreno/Muros y Viviendas

Se realizaron ajustes del terreno tomando como referencia la ortofoto del área de estudio, se modificaron los muros y viviendas. Estas consistieron en generar estos elementos sobre la superficie del terreno con una altura constante (Modificación de terreno como *multipoints*), recreando como son en realidad estas estructuras como se observa en la figura 51. Debido a que la información Topográfica es un archivo DTM, no considera ninguna de las elevaciones de las estructuras existentes como edificaciones.

### 6.2.1.3. Canales y cunetas

De la misma forma se realizaron los ajustes de los canales existentes (Modificaciones de terreno como canal), con las secciones según como se encuentran en la zona de estudio. Así como también se consideraron las cunetas existentes del área de estudio como se observa en la siguiente figura.

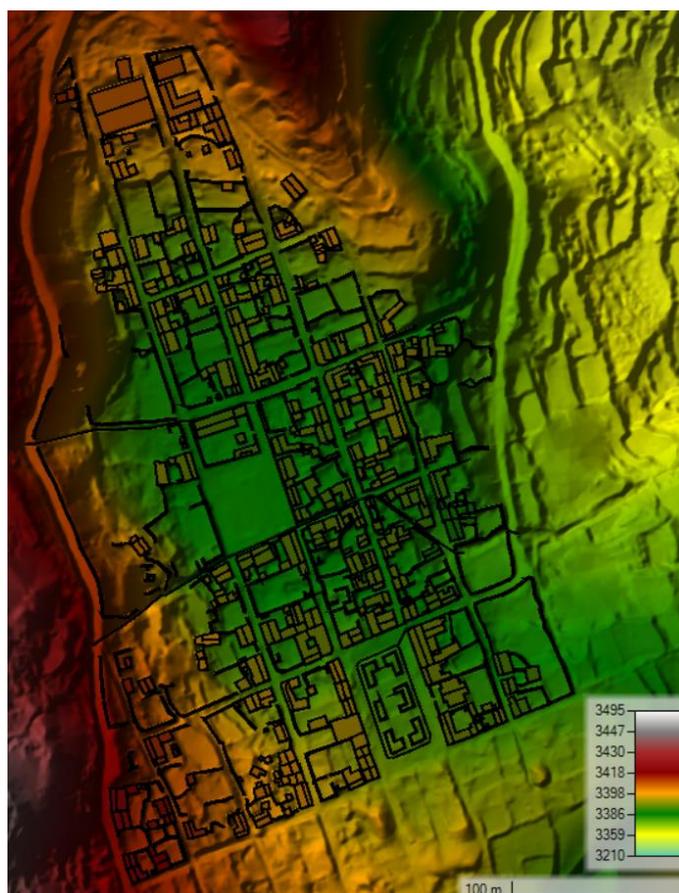


Figura 51: Modificaciones del terreno

### 6.3. CONFIGURACIÓN DE LA MALLA COMPUTACIONAL

#### 6.3.1. Generación de la mallada computacional

La creación de la malla sobre la cual se realizarán los cálculos del modelo matemático se realiza desde la pestaña “Geometries” en la cual al desglosar se presenta la herramienta “2D Flow Areas” y que al ser activada aparecen las opciones principales para la generación del modelo, siendo “Perimeters” la opción que permite editar la geometría es decir dibujar el borde de la malla computacional en toda la cuenca urbana.

Las mallas de análisis en toda el área fueron de 0.40 m x 0.40 m con mallas estructuradas, que luego fueron modificadas según las estructuras existentes. Los muros y viviendas del terreno modificadas fueron divididas en mallas no estructuradas, para considerar con más detalles el análisis en estas estructuras. Se consideró áreas de 0.36x0.36 en el interior, en el perímetro áreas de 0.35 m con una repetición y lejos al perímetro con repartición de 0.38 m; con el fin de tener mayor fidelidad hidrodinámica alrededor de las viviendas y muros. Los

canales de manera similar fueron refinados mediante mallas no estructuradas de 0.34 m con una repetición y lejos al perímetro con repartición de 0.36 m; para una mejor representación hidrodinámica en estas estructuras.

Si bien el mallado computacional podría ser menor y tener una mejor representación hidrodinámica; el modelo debe cierta estabilidad computacional que se puede medir mediante el coeficiente de Courant que relaciona el tamaño de malla computacional y paso de tiempo computacional; siendo así este factor tomado en cuenta para la elección del tamaño de la malla computacional mínimo; que para el modelo fue de 0.34 m y un paso de tiempo de 0.2 segundos.

Luego se procedió a asignar las características del suelo relevantes para simular la respuesta hidrológica e hidráulica. Es así como se determinaron los coeficientes de rugosidad y número de curva como se describe a continuación.



Figura 52: Mallado computacional.

### 6.3.1.1. Coeficientes de Rugosidad

Con respecto al coeficiente de Manning, se ha revisado la teoría de Chow (1994) el cual sugiere los valores de rugosidad correspondientes a los tipos de superficies que se evidenciaron en la zona de estudio. De la ortofoto y visita de campo se asignó los siguientes rangos de coeficientes de Manning a los distintos tipos de uso de suelo como se muestra en la siguiente tabla 29:

Tabla 29: Coeficientes de Manning y porcentajes de impermeabilidad

Uso de Suelo en área de estudio	Tipo de canal y descripción Chow (1998)	Coeficiente de Manning Chow (1998)
Calle y carretera	Superficie excavada en tierra, recto y uniforme que contiene gravas y sección limpia	0.022 – 0.030
Losa de concreto	Superficie de concreto terminado con llana de madera	0.013 – 0.016
Patio de Vivienda	Superficie excavada en tierra, recta y uniforme, en estado limpio, después de exposición a la intemperie	0.018 – 0.025
Cultivo	Planicies de inundación que presentan áreas de cultivo que están en crecimiento	0.020 – 0.040
Pastizal	Planicies que presenta pastizales sin matorrales con pastos cortos	0.025 – 0.035
Jardín	Superficies como planicies de inundación que presentan matorrales dispersos y maleza	0.035 – 0.070
Canal de Concreto	Superficies de concreto sin pulir	0.014 – 0.020
Canal de Tierra	Superficies excavadas con pala que presentan matorrales ligeros en las bancas	0.035 – 0.060
Alcantarilla	Canales sin mantenimiento de fondo pedregoso.	0.025 – 0.040

Los valores que han sido asignados a cada tipo de suelo se han realizado en función de las características evidenciadas en la visita de campo. Además, se ha considerado un porcentaje de áreas impermeable a cada una de las áreas, según el uso de suelo.

Los rangos de valores fueron ajustados en el proceso de calibración del modelo, junto con los valores de impermeabilidad para cada tipo de uso de suelo. Finalmente se ha considerado los coeficientes de Manning y porcentajes de área impermeable como se muestra en la tabla 30.

Tabla 30: Coeficientes de Manning y porcentajes de impermeabilidad

Uso de Suelo	Coeficiente de Manning	% Impermeable
Calle y carretera	0.024	95
Losa de concreto	0.015	99
Patio de Vivienda	0.022	90
Cultivo	0.031	5
Pastizal	0.032	5
Jardín	0.033	5
Canal de Concreto	0.016	98
Canal de Tierra	0.056	75
Alcantarilla	0.039	98

Para la configuración de los diferentes valores de  $n$  de Manning en el ámbito de estudio, se ha generado el mapa de uso de suelos en formato *shape* usando como herramienta un GIS. Este archivo fue importado a la geometría del modelo donde se le asignó los valores de Manning designados en la tabla 30. Importante indicar que el valor del coeficiente de Manning asignado para las viviendas y muros fue de 10000 y 0 % de impermeabilidad respectivamente, valores extremos, con el fin de recrear una superficie que no conduce agua en su superficie (coeficiente de Manning alto) y es absorbida en ella (porcentaje de impermeabilidad bajo); con el fin de no redundar en condiciones de entrada sobre estas superficies; debido a que en las viviendas se ingresarán condiciones de entrada obtenidos de los hidrogramas de escorrentía obtenido de los techos experimentales escalados en función del área de cada techo.

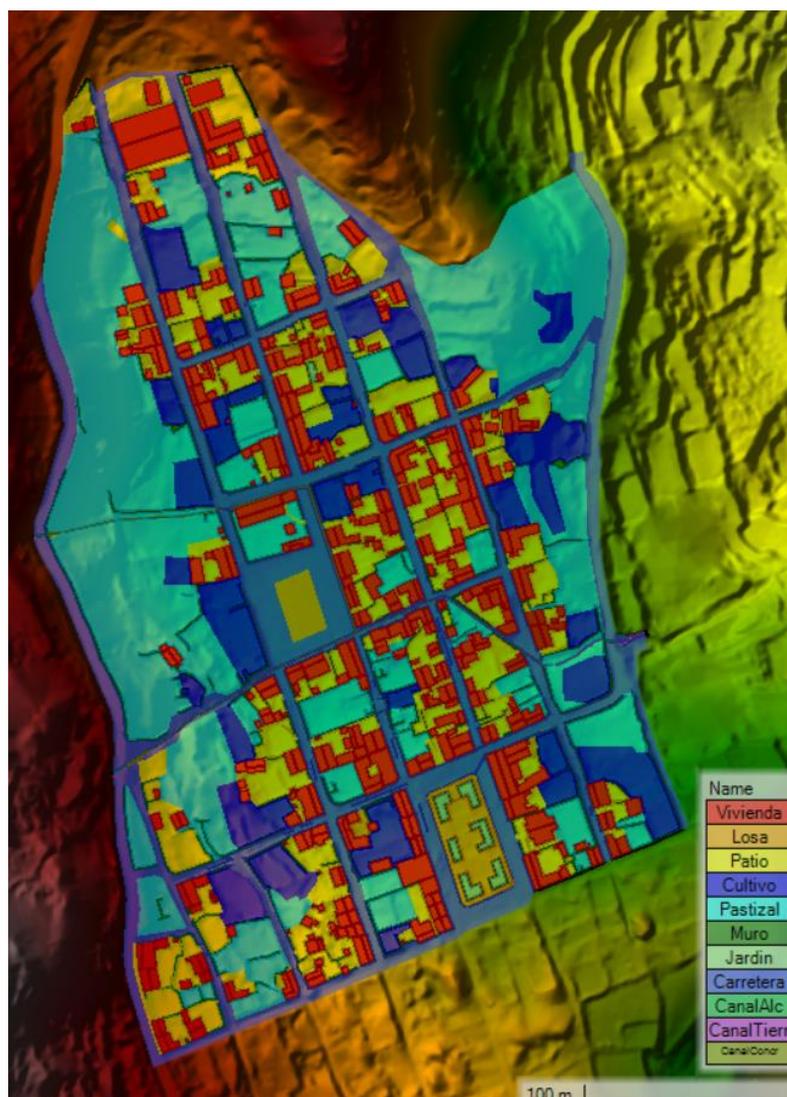


Figura 53: Mapa de Coeficiente de Manning

### 6.3.1.2. Número de Curva (CN) del CSC

Los valores del Número de Curva (CN) utilizados corresponden a condiciones de humedad Tipo III (CN III), ya que en la estación de humedad la información pluviométrica indica recurrentemente que los cinco días anteriores llueve más de 2.1" (53.3 mm). Para la estimación de estos valores fue necesario en primer lugar identificar la descripción de suelo; según la información de la FAO y UNESCO, sobre los tipos de suelos del Perú, para la zona de estudio (centro poblado San Pedro de Larcay, Ayacucho) se identificó un tipo de suelo *Leptodol dístrico – Andosol vítrico (Lpd-Anz)*, al cual le corresponde un grupo hidrológico B (Portuguez y Verano, 2019).

En base a esta información, los valores de CN fueron calculados para condiciones de humedad de Tipo III. Así se obtienen los valores de CN correspondientes a los usos de suelos de la cuenca urbana, valores que fueron ajustados en el proceso de calibración del modelamiento.

El cambio de condiciones normales (CN II) a condiciones húmedas (CN III) se realizó mediante la siguiente ecuación (34).

$$CN(III) = \frac{23CN(II)}{10 + 0.13CN(II)}$$

Tabla 31: Valores de Número de Curva CN (III)

Uso de Suelo	CN (II) Condiciones Normales	CN (III) Condiciones Húmedas
Calle y carretera	82	91.3
Losa de concreto	98	99.1
Patio de vivienda	82	91.3
Cultivo	71	84.9
Pastizal	61	78.2
Jardín	61	78.2
Canal de Concreto	98	99.1
Canal de Tierra	85	92.9
Alcantarilla	98	99.1

Para la configuración de los diferentes valores de CN en el ámbito de estudio, se ha generado el mapa de números de curva en formato *shape* usando como herramienta un Sistema de Información Geográfica (GIS, siglas en inglés). Este archivo fue importado a la geometría del modelo donde se le asignó los valores de CN designados en la tabla 31. Es importante indicar que el valor del coeficiente de CN asignado para las viviendas y muros fue de 0, valor extremo, con el fin de recrear una superficie que absorba toda el agua en su superficie; con el fin de no redundar en condiciones de entrada sobre estas superficies; debido a que en las viviendas se ingresarán condiciones de entrada obtenidos de los hidrogramas de escorrentía de los techos experimentales escalados en función del área de cada techo.



Figura 54: Mapa de Números de Curva

## 6.4. CONDICIONES DE BORDE

### 6.4.1. Precipitación

En las condiciones de borde se consideró la entrada de precipitación correspondiente a toda el área de modelación; esta correspondiente a intensidades para periodos de retorno de 2, 5 y 10 años con intervalos de tiempo de 10 minutos (valor que se usó para realizar los ensayos en el modelo experimental del simulador de lluvias) y una duración total de 1 hora. A partir de las curvas IDF obtenidas en el Capítulo IV, se construyeron los hietogramas de diseño con el método de bloques alternos, como se detalla a continuación.

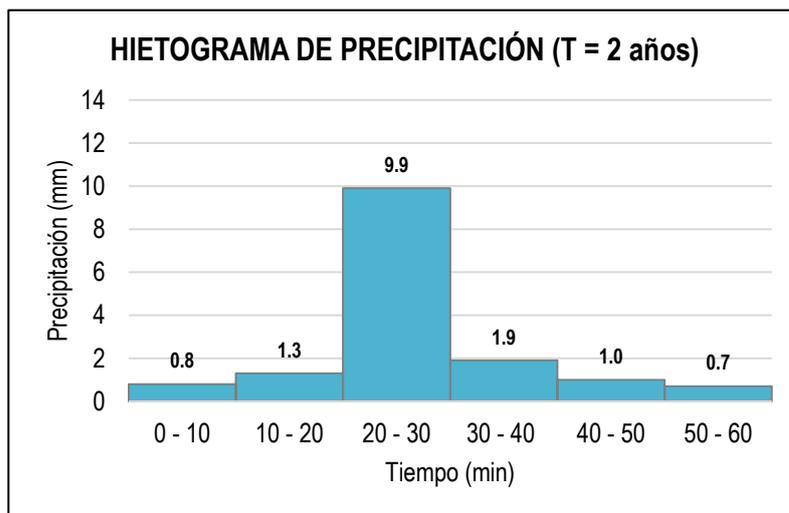
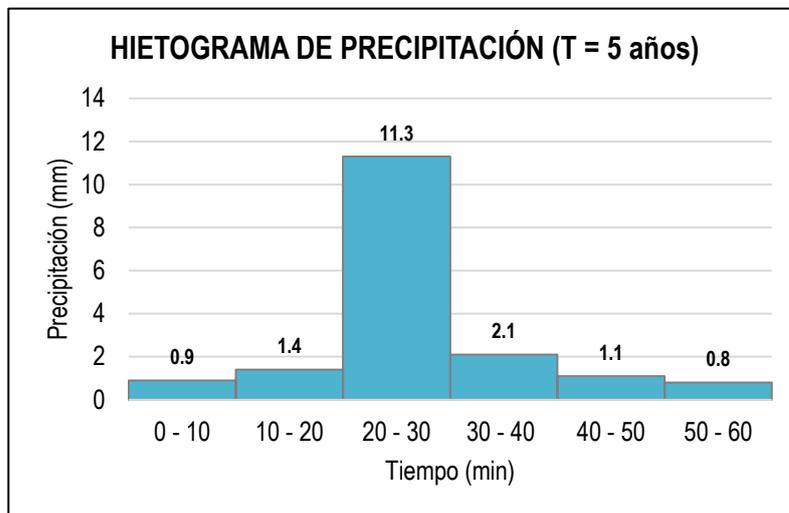
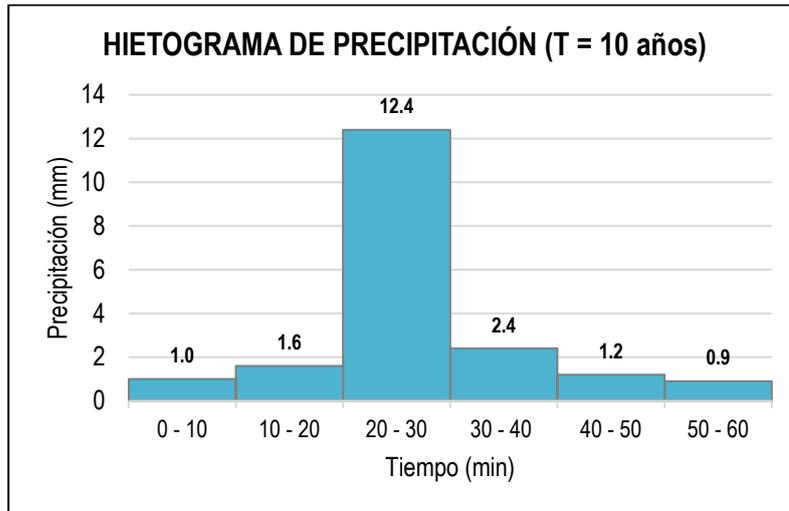


Figura 55: Hietogramas de diseño.

Para la simulación se consideró el pulso máximo, es decir los 10 minutos de mayor precipitación de los hietogramas, teniéndose así las precipitaciones a simular para

una duración de 10 minutos como se ve en la tabla 32. El hecho de simular el pulso máximo se debe, además, que es simulador de lluvias no tiene la capacidad generar intensidades bajas inferiores a 53.2 mm/h como se detallará en el Capítulo VII, lo cual impide que el simulador genere hietogramas de 60 minutos con variaciones en el tiempo.

Tabla 32: Precipitaciones de entrada para el modelamiento hidráulico

Periodos de Retorno (Años)	Precipitación (mm)	Intensidad (mm/h)
2	9.9	59.4
5	11.3	67.6
10	12.4	74.6

#### 6.4.2. Hidrogramas de flujo

Las condiciones de borde dentro del área de estudio consideraran el ingreso de flujo a cada escenario de tormenta para los techos de cada vivienda, estos representados en hidrogramas. En este caso se ingresaron hidrogramas de salida para techos experimentales (TV y TC) que fueron determinados en el modelo experimental descrito en el Capítulo V. Se simula para cada una de las precipitaciones de la tabla 32. Cada uno de los techos de las viviendas fueron considerados como una condición de entrada con sus respectivos hidrogramas, que fueron escalados del modelo experimental, según la proporción del área que tiene cada techo. Se tomaron en consideración un total de 442 techos de viviendas, este mismo número son el total condiciones de borde en forma de hidrogramas que ingresan al área de estudio como se observa en la figura 56. En la figura 57 y figura 58 se muestran un ejemplo de los 442 hidrogramas escalados a cada techo que han sido ingresados al modelo para techos convencionales y techos verdes. Cabe mencionar que las viviendas al ser consideradas sus hidrogramas, la precipitación que cae obre esta superficie no fue considerado en el modelo, para evitar redundancias de entrada, o duplicar flujos.

Los techos de las viviendas consideradas en el modelamiento se muestran en el Anexo J. Mapa de Techos Convencionales y Anexo K. Mapa de Techos Verdes. En cada uno de los casos estos se ha considerado 442 viviendas en total; para los techos verdes se ha considerado 440 viviendas con techo verde y 2 techos con techo convencionales, ya que esos dos techos no puedes ser implementados

con techo verde. Así, para el modelo sus hidrogramas de estos 2 techos fueron considerados como techo convencional, como se muestra en la figura 58.

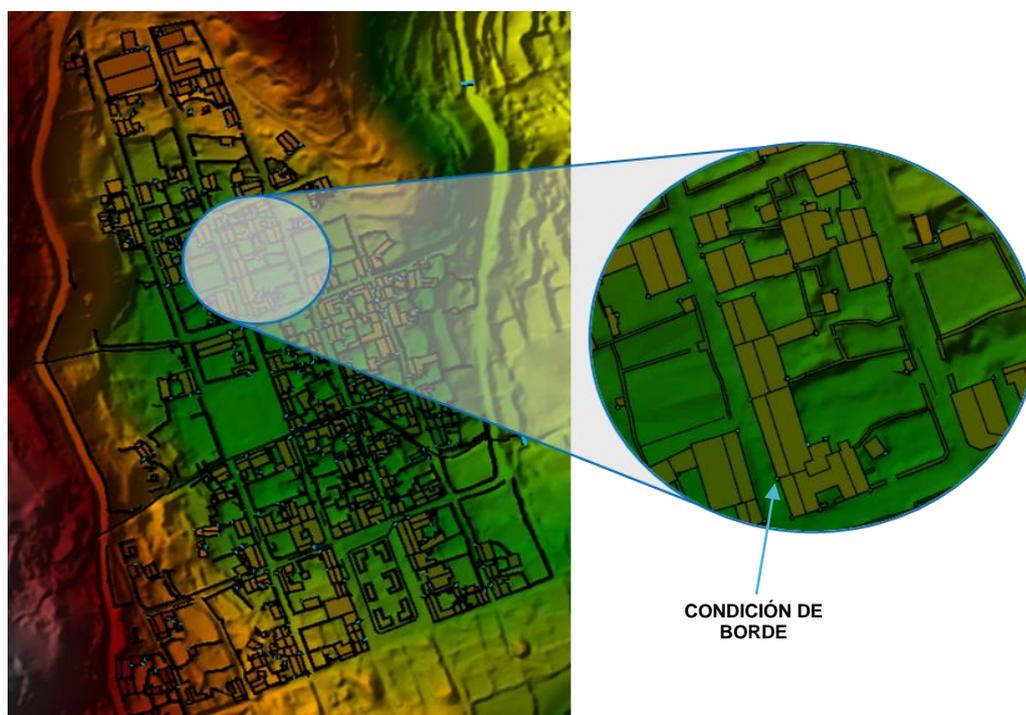


Figura 56: Condiciones de borde para cada techo de viviendas

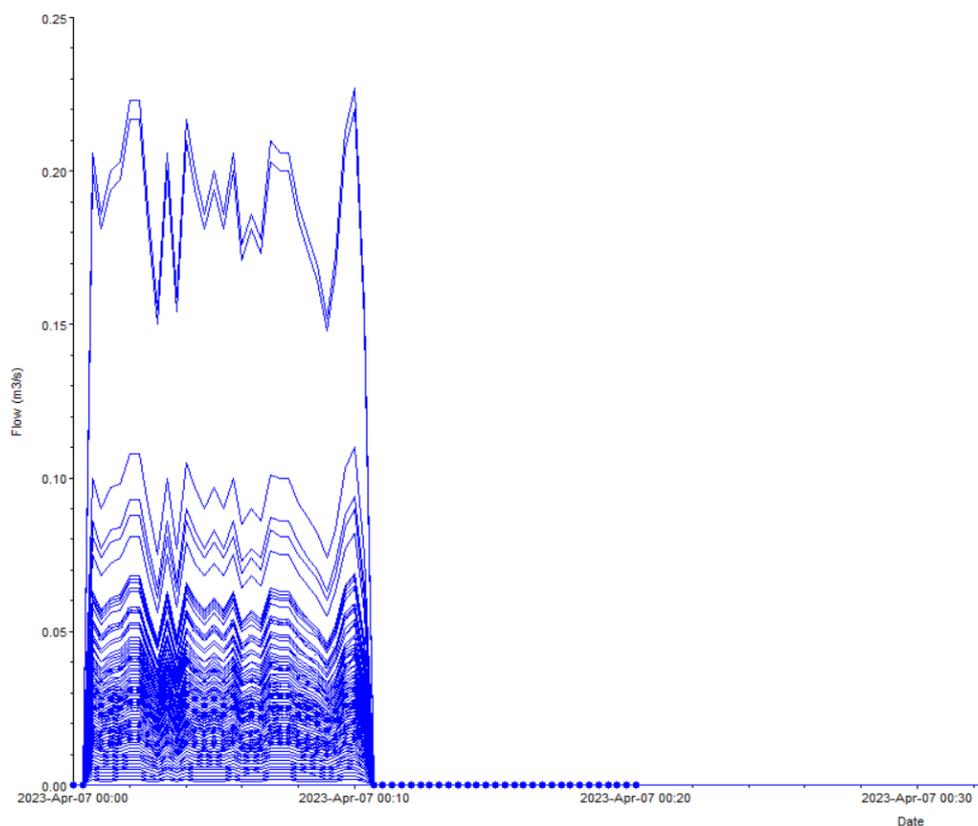


Figura 57: Hidrogramas escalados para viviendas con techo convencional

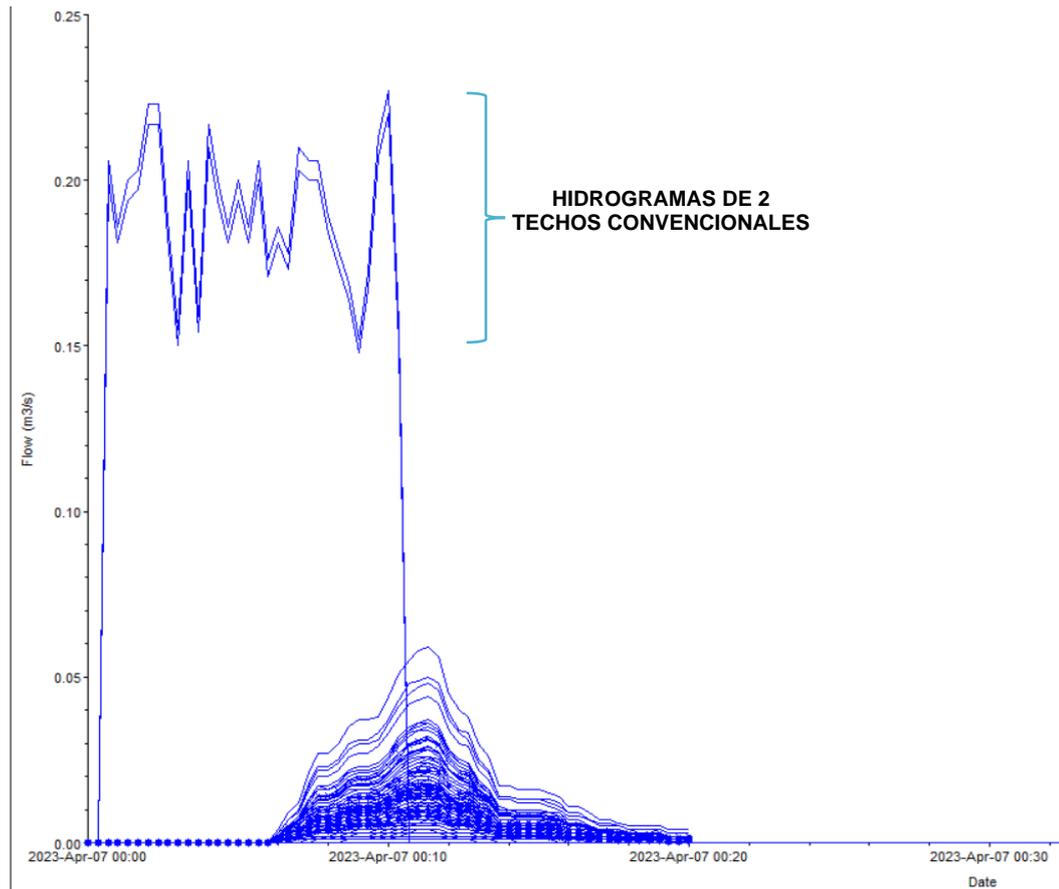


Figura 58: Hidrogramas escalados para viviendas con techo verde

Se puede observar dos hidrogramas de gran magnitud que se mantienen iguales para los dos escenarios, tanto techos verdes y convencionales. Este debido a que son techos que no pueden ser adaptados a un sistema de techo verde. Así su hidrograma es igual en los dos escenarios.

En el Anexo J y Anexo K se muestra las viviendas de techo convencional y techo verde que han sido consideradas en el modelamiento, siendo estas en su totalidad, representando un 17.3 % del área de la cuenca urbana en estudio.

#### 6.4.3. Pendiente de fondo

Consiste en indicarle al software la ubicación de las condiciones de contorno, se ha introducido aguas abajo dos condiciones de borde para la salida del flujo con pendientes media del cauce de 0.18 m/m y 0.07 m/m según las condiciones topográficas, como se muestra en la siguiente figura.

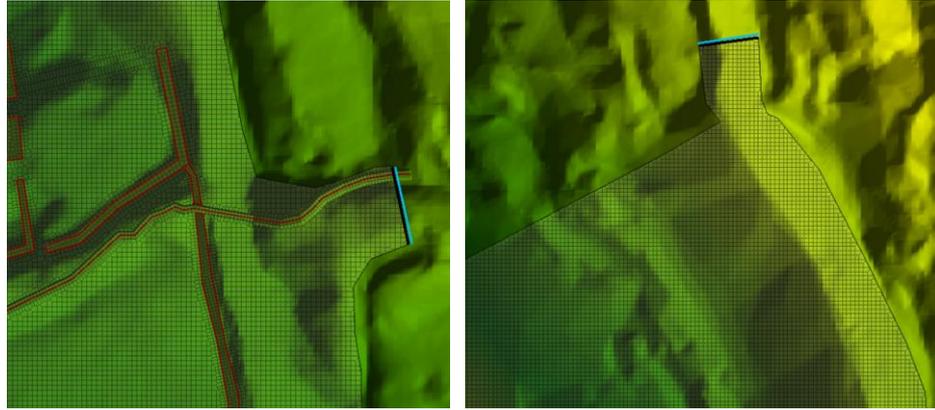


Figura 59: Condiciones de borde, salidas

### 6.5. CALIBRACIÓN DEL MODELO

La calibración del modelo se realizó debido a la incertidumbre que se produce al estimar los parámetros del modelo como el coeficiente de Manning, el número de curva (CN) y el porcentaje de área impermeable. Para ello se identificó un evento sucedido en el área de estudio para verificar la conformidad del modelo. Así corroborando y ajustando los parámetros previamente establecidos según su uso de suelo, conseguir que el modelo reproduzca la realidad.

El evento considerado para la calibración ocurrió el día 4 de febrero del 2023, presentándose una precipitación máxima de 19.6 mm/día, según la estación pluviométrica “Paucaray” del SENAMHI. Se registraron marcas de agua de la sección de la alcantarilla de referencia de la zona de estudio, que es el principal colector del agua de la cuenca urbana, presentando una marca de agua del evento mencionado de 19 cm aguas abajo de la alcantarilla. Según la ecuación de Manning para el dimensionamiento de canales, ecuación (49), para un ancho de alcantarilla rectangular de 0.70 m, tirante de 0.19 m, pendiente longitudinal de 2.5% y coeficiente de rugosidad de 0.039 (tabla 34); se tiene un caudal medido de 0.1335 m<sup>3</sup>/s.

$$Q = \frac{1}{n} A R^{\frac{2}{3}} S^{\frac{1}{2}} \quad (49)$$

Donde  $Q$  es el caudal (m<sup>3</sup>/s),  $n$  es el coeficiente de rugosidad de Manning,  $A$  es el área de la sección hidráulica (m<sup>2</sup>),  $R$  es el radio hidráulico (m) y  $S$  es la pendiente longitudinal en (m/m).



Figura 60: Huella hídrica aguas debajo de alcantarilla de referencia

El evento considerado para la calibración fue la condición de borde representada por la precipitación máxima diaria mencionada anteriormente (19.6 mm/día), esta fue distribuida en el tiempo según la metodología Dyck y Peschke mediante la ecuación (24), como se muestra en la tabla 33. Así, para la precipitación máxima en 24 horas de 19.6 mm, se tiene una precipitación de 5.66 mm durante 10 minutos, evento considerado para realizar la calibración de los parámetros.

Tabla 33: Precipitaciones máximas para distintas duraciones

Duración d (min)	Precipitación $P_d$ (mm)
10	5.66
15	6.26
20	6.73
30	7.45
40	8.00
50	8.46
60	8.86
120	10.53
180	11.65

Duración d (min)	Precipitación P <sub>d</sub> (mm)
240	12.52
300	13.24
360	13.86
480	14.89
720	16.48
1080	18.24
1440	19.60

Una vez realizado el procesamiento de los datos del modelo se llegó a ajustar los parámetros mencionados, con el fin de obtener un nivel de aguas en la alcantarilla similar al medido en campo; así, mediante el modelo de calibración se obtuvo un nivel de 18.8 cm como se muestra en la siguiente figura. De la ecuación de Manning, ecuación (49), para un ancho de alcantarilla rectangular de 0.70 m, tirante de 0.188 m, pendiente longitudinal de 2.5 % y coeficiente de rugosidad de 0.039 (tabla 34); se tiene un caudal calibrado de 0.1315 m<sup>3</sup>/s.

Respecto al valor medido en campo se tiene un error relativo de caudal de 1.5 %, lo cual es aceptable para el modelamiento.



Figura 61: Tirantes de calibración en la alcantarilla de referencia

Del modelo calibrado se obtuvieron los valores ajustados del coeficiente de Manning y el porcentaje de impermeabilidad y el número de curva descritos anteriormente y que se muestran en la tabla 34, los cuales representan adecuadamente al uso de suelos de la zona.

Tabla 34: Parámetros calibrados del modelo

Uso de Suelo	Coficiente de Manning	%Impermeable	CN (III) Condiciones Húmedas
Calle y carretera	0.024	95	91.3
Losa de concreto	0.015	99	99.1
Patio de Vivienda	0.022	90	91.3
Cultivo	0.031	5	84.9
Pastizal	0.032	5	78.2
Jardín	0.033	5	78.2
Canal de Concreto	0.016	98	99.1
Canal de Tierra	0.056	75	92.9
Alcantarilla	0.039	98	99.1

## 6.6. PROCESAMIENTO

Finalmente, con el ingreso de todos los datos del terreno, geometría, condiciones de borde, condiciones iniciales, se procede a realizar el procesamiento de toda la información, se ha realizado con un paso del tiempo de computación de 0.2 segundos, que cumple con las condiciones de coeficiente de Courant.

## 6.7. SIMULACIÓN DE ESCENARIOS

Se simularon todos los escenarios correspondientes a los periodos de retorno para los que se determinó las curvas IDF, además se consideró los casos para distintas pendientes de techos, según los ensayos realizados en el LNH, el cual se detalló en el Capítulo IV.

Los parámetros hidráulicos que se usaron en los escenarios son los mismos que se obtuvieron en el proceso de calibración. La diferencia entre escenarios se refleja en la precipitación usada y los hidrogramas de entrada para cada vivienda (sea techo convencional o techo verde, obtenidos de los ensayos experimentales).

Los escenarios planteados son:

Tabla 35: Escenarios de modelamiento hidráulico

Periodo de Retorno (T)	Intensidad (mm/h)	Pendiente de Techo (P)	Techo	Escenario
2 años	59.4	10%	Techo Convencional	P10T2TC
			Techo Verde	P10T2TV
		15%	Techo Convencional	P15T2TC
			Techo Verde	P15T2TV
		20%	Techo Convencional	P20T2TC
			Techo Verde	P20T2TV
5 años	67.6	10%	Techo Convencional	P10T5TC
			Techo Verde	P10T5TV
		15%	Techo Convencional	P15T5TC
			Techo Verde	P15T5TV
		20%	Techo Convencional	P20T5TC
			Techo Verde	P20T5TV
10 años	74.6	10%	Techo Convencional	P10T10TC
			Techo Verde	P10T10TV
		15%	Techo Convencional	P15T10TC
			Techo Verde	P15T10TV
		20%	Techo Convencional	P20T10TC
			Techo Verde	P20T10TV

**CAPÍTULO VII: DISCUSIÓN DE RESULTADOS****7.1. RESULTADOS DE CALIBRACIÓN DE SIMULADOR DE LLUVIAS****7.1.1. Intensidad de Precipitación**

Las intensidades de precipitación fueron determinadas como la suma de los caudales de los sensores de flujo 1/2" (1) y 1/2" (2) entre el área a ser mojada, según la ecuación (43):

$$Q = \frac{IA}{3600}$$

Donde  $Q$  es el caudal en (l/s),  $I$  es la intensidad de precipitación en (mm/h) y  $A$  es el área en (m<sup>2</sup>).

El sensor de flujo 1/2" (1) y sensor 1/2" (2) corresponden a cada mitad del techo donde se ubicarán los techos a experimentar.

Se giró la válvula de compuerta cada 60°, con el fin de variar el caudal de entrada al sistema con el sensor de flujo de 3/4"; así obteniéndose distintas intensidades de precipitación como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 36: Intensidades en función de giro de cierre de válvula

Medida (giros 60°)	S 3/4" (L/s)	S 1/2" (1) (L/s)	S 1/2" (2) (L/s)	S 1/2" (1+2) (L/s)	Intensidad (mm/h)
0	0.56	0.18	0.19	0.36	73.8
5	0.56	0.17	0.18	0.36	72.3
10	0.55	0.17	0.19	0.36	72.4
15	0.54	0.17	0.18	0.35	71.6
16	0.55	0.16	0.17	0.33	67.6
18	0.53	0.16	0.17	0.33	67.0
20	0.51	0.16	0.17	0.33	67.4
21	0.50	0.15	0.17	0.31	63.2
22	0.47	0.15	0.15	0.30	60.9
22.5	0.44	0.14	0.15	0.29	59.2
23	0.44	0.13	0.15	0.29	58.0
24	0.41	0.13	0.15	0.28	56.5
24.5	0.38	0.13	0.14	0.27	54.4
25	0.36	0.13	0.14	0.26	53.2

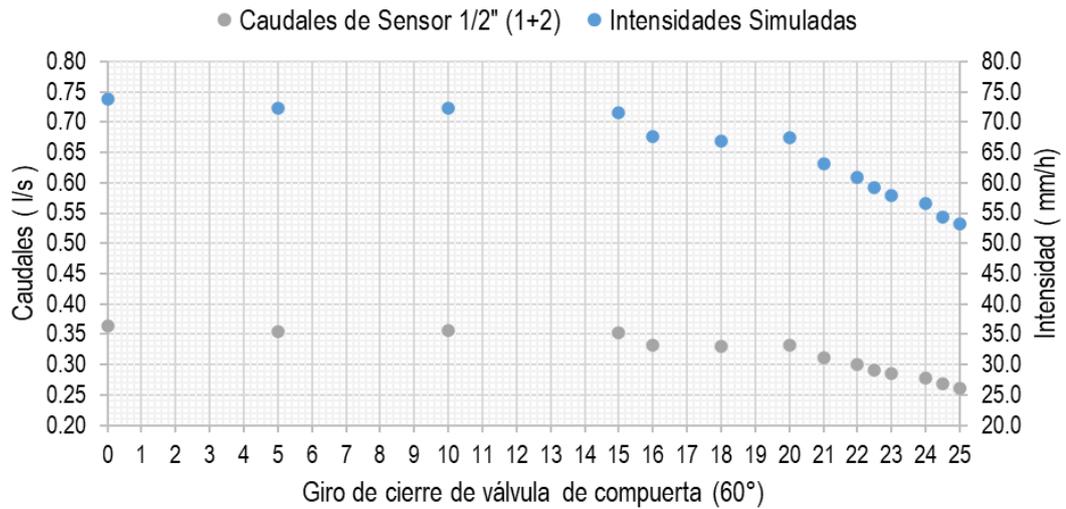


Figura 62: Intensidades en función de giro de válvula de compuerta

Los resultados de la calibración de las intensidades de precipitación muestran que el simulador de lluvia tiene la capacidad de simular lluvias de 53.2 a 73.8 mm/h. El menor valor se obtiene para un cierre de 25 giros de 60° de la válvula de compuerta, ya que mayores giros de cierre de esta, la lluvia generada no llega a cubrir toda la plataforma de estudio. El mayor valor se obtiene con una abertura total de la válvula, valor que se limita por la máxima capacidad de impulsión de la bomba. Además, se puede evidenciar que, a partir de 19 giros de cierre de la válvula, se observa una variación considerable de la intensidad de precipitación, ya que valores menores a ello, se obtienen intensidades muy cercanas entre sí, lo cual lo hace difícil de calibrar.

De las intensidades obtenidas experimentalmente, se eligieron las que representan las tormentas de diseño requeridas a simular obtenidas de las curvas IDF, para periodo de retorno de 2 a 5 años y duraciones de 10 minutos. Obteniéndose valores muy aproximados a estas, con errores relativos menores al 1 %, que se considerada despreciable estadísticamente. Esto hace que las lluvias simuladas sean adecuadas para su uso como las lluvias de diseño. Los detalles de las tormentas de diseño y experimentales de muestran con más detalle en la tabla 37.

Tabla 37: Error relativo entre tormentas de diseño y experimentales

Periodos de Retorno (años)	Tormentas de Diseño (mm/h)	Tormentas Experimentales (mm/h)	Error Relativo (%)
2	59.4	59.2	0.5
5	67.6	67.6	0.1
10	74.6	73.8	1.0

7.1.2. Distribución de Uniformidad

Se realizaron mapas de distribución para observar mejor la uniformidad de las intensidades de precipitación en la plataforma de estudio, que se basa en la altura de precipitación en los recipientes de agua. A continuación, se muestran los mapas de distribución de uniformidad para las distintas tormentas de diseño, en toda la plataforma de estudio.

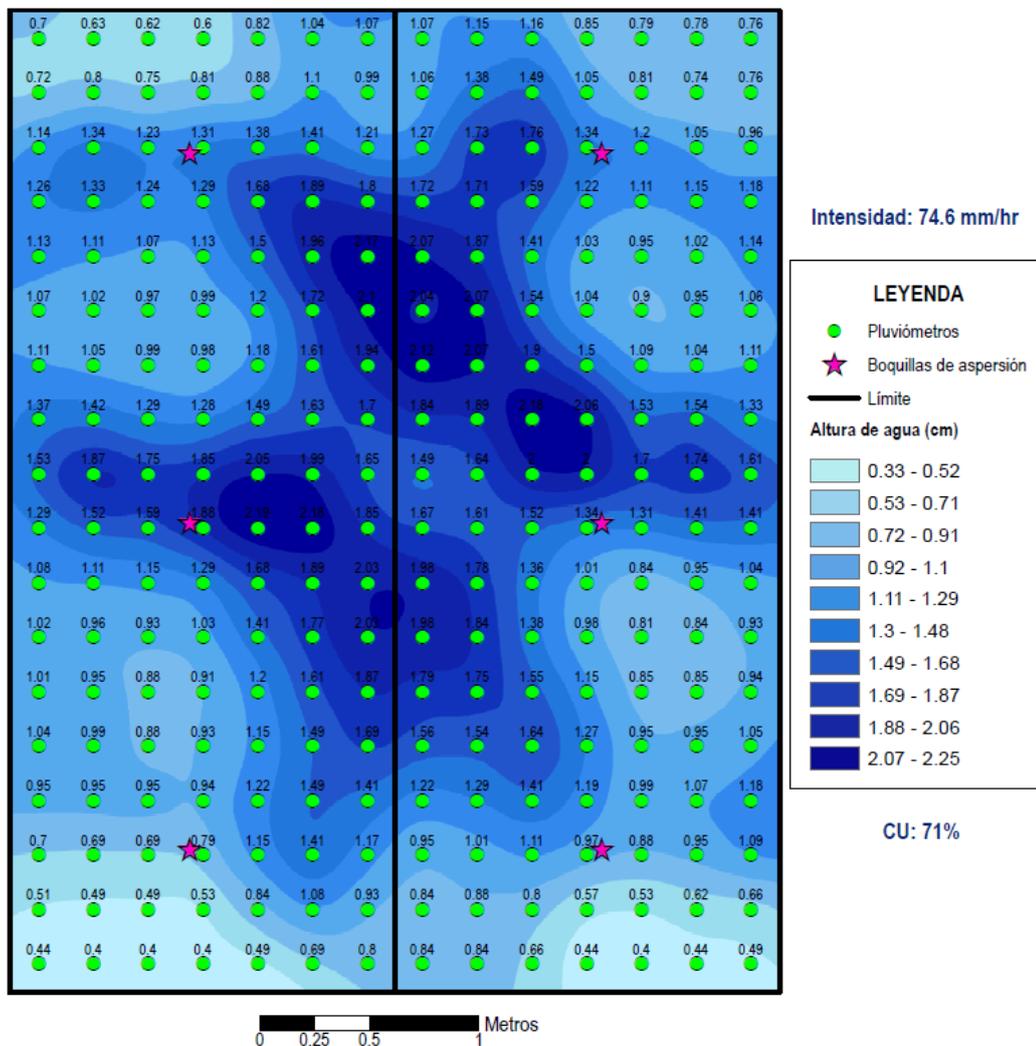


Figura 63: Distribución de precipitación para la intensidad 74.6 mm/h

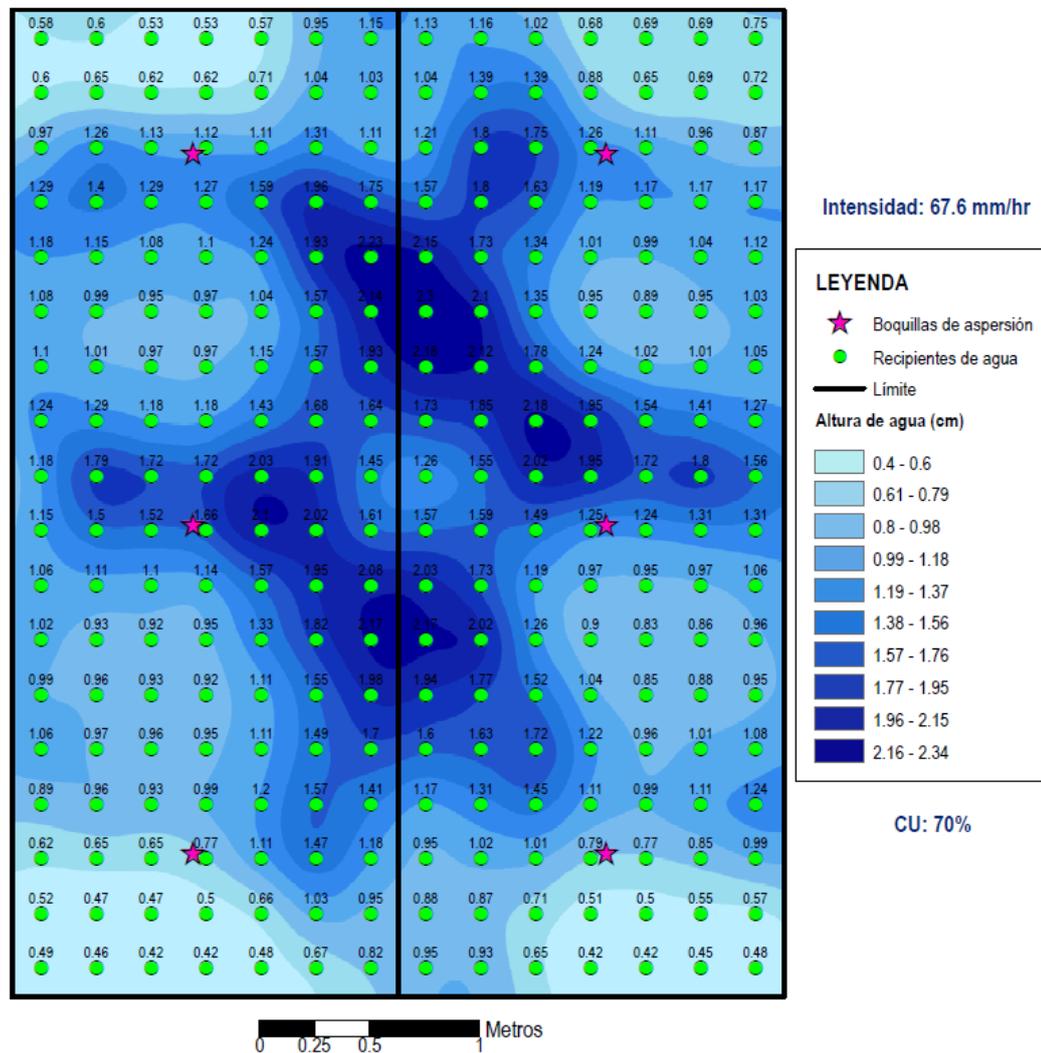


Figura 64: Distribución de precipitación para la intensidad 67.6 mm/h

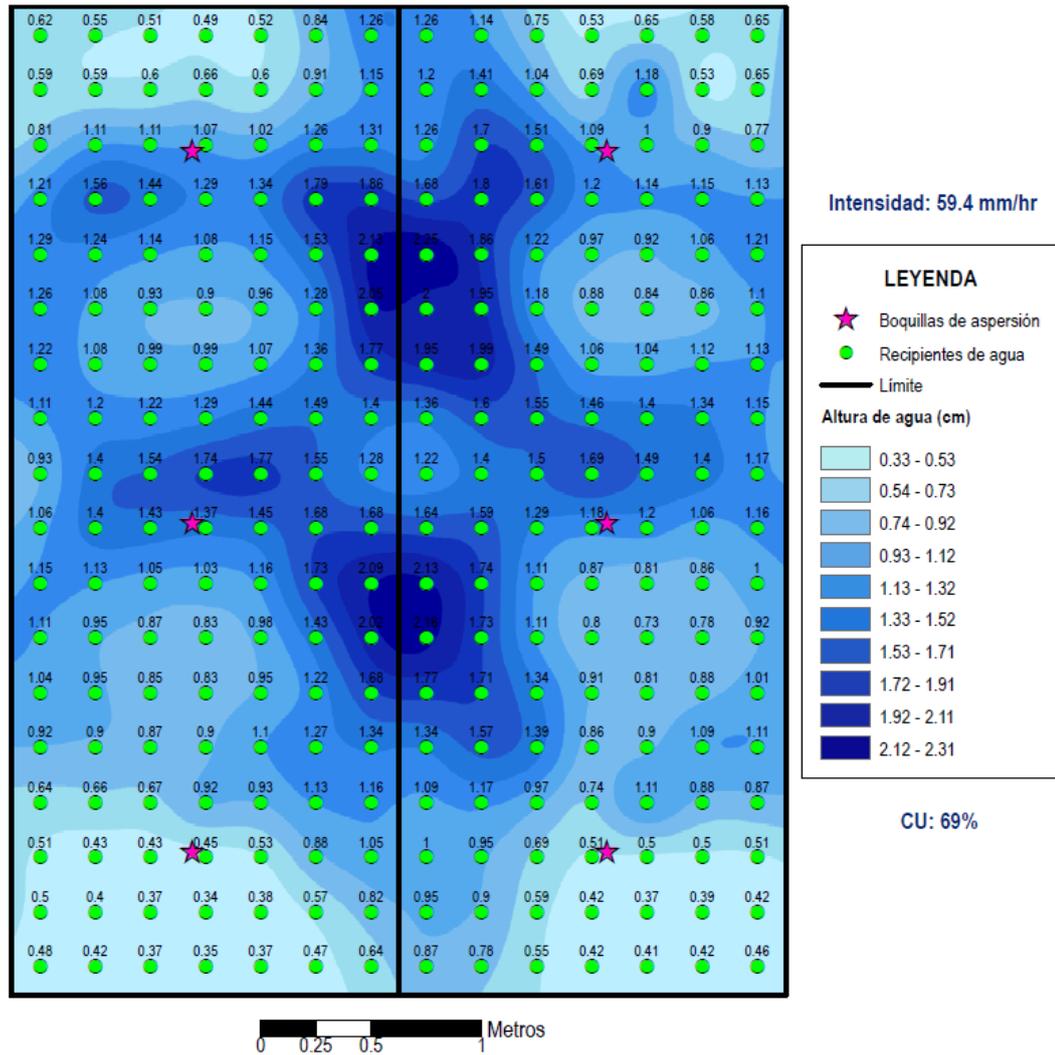


Figura 65: Distribución de precipitación para la intensidad 59.4 mm/h

Además, se puede observar un cuadro resumen de los ( $C_u$ ) obtenidos mediante la ecuación de Christiansen, ecuación (37), y se muestra en la siguiente tabla 38.

Tabla 38: Coeficiente de Uniformidad ( $C_u$ )

Periodos de Retorno (años)	Tormentas de Diseño (mm/h)	Coeficiente de Uniformidad ( $C_u$ )
2	59.4	69%
5	67.6	70%
10	74.6	71%

Los resultados de la distribución de uniformidad muestran que, a mayor intensidad mayor es el coeficiente de uniformidad, relación que concuerdan con estudios realizados por Yakubu y Yusop (2017). Se observa de los mapas de distribución que el agua de lluvia tiende llegar a la parte de la intersección de la proyección de las boquillas de aspersión; y en los extremos la plataforma la llegada del agua es

menor, pero en general se observa una distribución constante y uniforme en toda la plataforma.

### 7.1.3. Tamaño de gotas

El tamaño de gotas promedio determinado se tomaron a partir de las masas de 50 muestras de gránulos de harina tomadas aleatoriamente, como se detallan en el Anexo L. Masas de gránulos de harina, los resultados de los diámetros determinados según las metodologías indicadas se muestran a continuación.

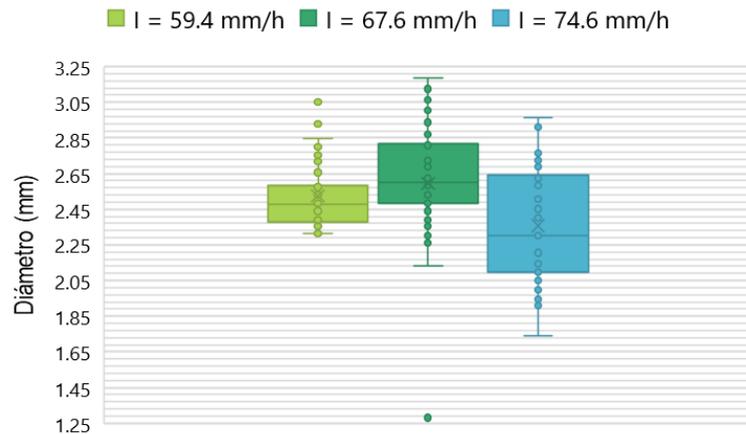


Figura 66: Distribución de diámetro de gránulos de harina  
Nota: Método de Luengas y de La Rosa (2015), ecuación (48)

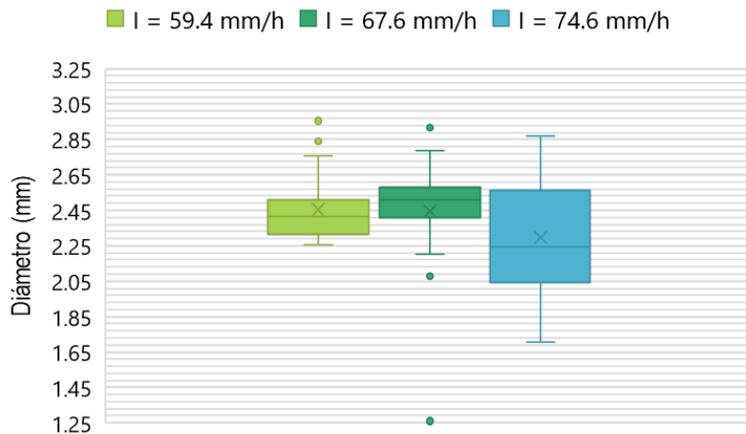


Figura 67: Distribución de diámetro de gránulos de harina  
Nota: Método de Ngasoh et al. (2020), ecuación (47)

Se obtuvo los siguientes resultados de diámetro promedio según el tipo de ecuación utilizada, y se clasifica su tipo según la tabla 39.

Tabla 39: Diámetro de promedio de gotas de lluvia

Periodos de Retorno (años)	Intensidad (mm/h)	Diámetro Promedio (mm) Luengas y De La Rosa (2015)	Diámetro Promedio (mm) Ngasoh et al. (2016)	Tipo de precipitación
2	59.4	2.52	2.45	Lluvia
5	67.6	2.51	2.44	Lluvia
10	74.6	2.36	2.30	Lluvia

Los valores del tamaño promedio de gotas clasifican a las lluvias simuladas en el tipo lluvia entre 1 a 3 mm según la clasificación de Roth (2003), tabla 27, además concuerda con la literatura, que considera que el tamaño de gotas de lluvia se encuentra entre 0.5 a 5 mm (Yakubu & Yusop, 2017).

En resumen, los resultados de la calibración del simulador de lluvias indican que el modelo experimental es capaz de reproducir las lluvias naturales con gran aproximación, razón por la que se considera adecuada para realizar el estudio de hidrogramas de escorrentía de los techos experimentales.

## 7.2. RESULTADOS DE ENSAYOS DEL MODELO EXPERIMENTAL

### 7.2.1. Hidrogramas experimentales

Los hidrogramas de escorrentía de los techos verdes y techos convencionales se muestran en la figura 68, 69 y 70; para las tres intensidades de precipitación correspondientes a los tres periodos de retorno.

Se puede apreciar que la lectura de los datos para el techo convencional muestra caídas y subidas debido a la sensibilidad de los sensores de flujo. Pero que de manera general mantienen una tendencia el cual es tomado en cuenta en el estudio.

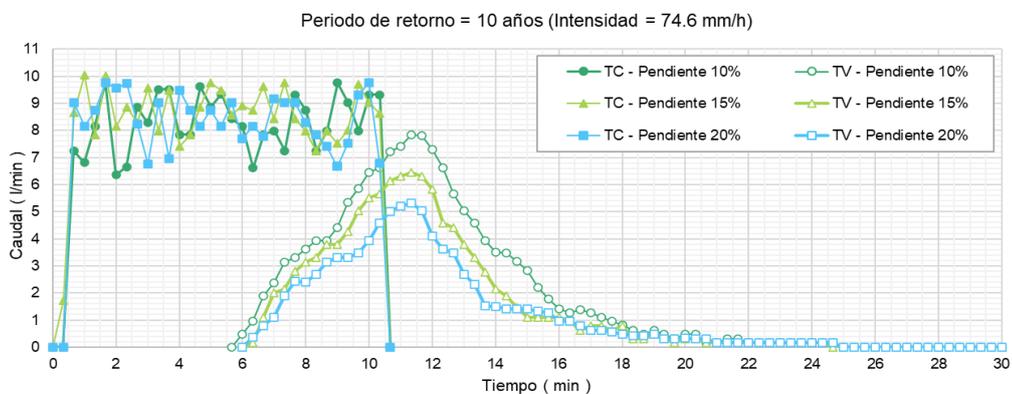


Figura 68: Hidrogramas de TC y TV para intensidad de 74.6 mm/h

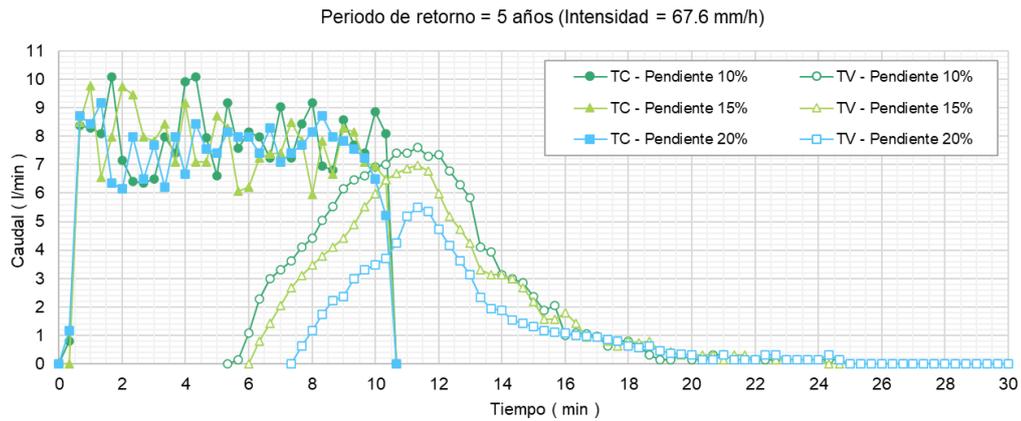


Figura 69: Hidrogramas de TC y TV para intensidad de 67.6 mm/h

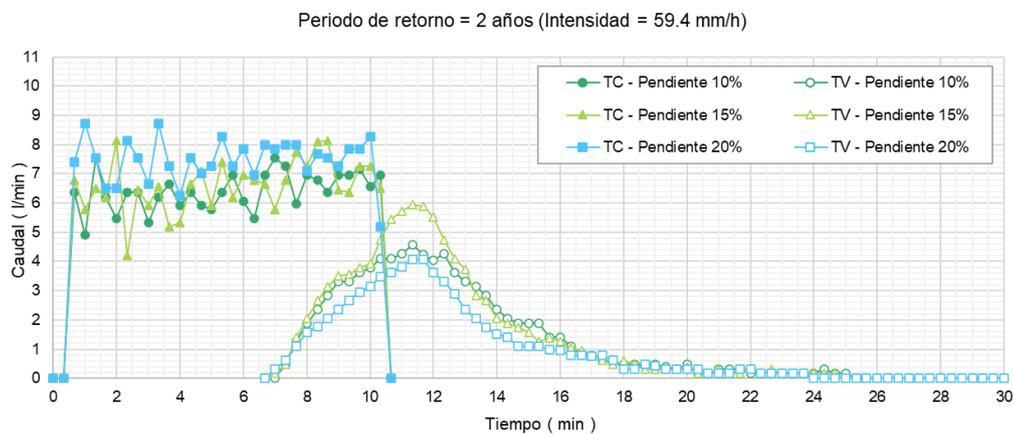


Figura 70: Hidrogramas de TC y TV para intensidad de 59.4 mm/h

De los resultados mostrados en las figuras anteriores, se observa que existe una diferencia al comparar las descargas experimentales. Los techos verdes muestran una reducción y retardo del caudal pico en comparación con los techos convencionales, para las tres intensidades y tres pendientes.

En la tabla 40, se detalla el porcentaje de reducción del caudal pico en los techos verdes en comparación a los TC. Los resultados obtenidos reflejan algunas similitudes con otros trabajos de investigación. La reducción del caudal pico oscila entre 20 % a 53 %, lo que indica que al implementar el techo verde el caudal se reduce de manera considerable con respecto al techo convencional, estos resultados presentan coincidencias con investigaciones realizadas por De Cuyper y Dinner (2005) quienes obtienen un valor de 59 %, Lopez et al (2020) quienes obtuvieron valores que van de 7 % a 17 % para intensidades que van de 120 mm/h

a 155 mm/h, y Amagua y Huayracocha (2021) quienes obtuvieron valores que van desde 17 % a 34 % para intensidades que van de 75 mm/h a 152 mm/h.

Tabla 40: Reducción del caudal pico

Periodo de Retorno (año)	Intensidad (mm/h)	Pendiente (%)	Caudal Pico (l/min)		Reducción del Caudal Pico (%)
			Techo Convencional	Techo Verde	
2	59.4	10	7.55	4.57	39%
		15	8.14	5.94	27%
		20	8.73	4.08	53%
5	67.6	10	10.10	7.62	25%
		15	9.76	6.98	28%
		20	9.17	5.51	40%
10	74.6	10	9.77	7.83	20%
		15	10.06	6.46	36%
		20	9.76	5.31	46%

Además de la reducción del caudal pico, se observa que la implementación del techo verde en comparación con el techo convencional genera un retardo en el tiempo de llegada del caudal pico que va de 9.3 a 10.3 minutos como se observa con mayor detalle en la tabla 41. Estos resultados son similares a los obtenidos en las investigaciones realizadas por Amagua y Huayracocha (2021) quienes obtuvieron un valor de retardo del caudal pico entre 8 a 9 minutos y De Cuper y Dinner (2005) que obtienen un valor de 8 minutos.

Tabla 41: Tiempo de retardo del caudal pico

Periodo de Retorno (año)	Intensidad (mm/h)	Pendiente (%)	Tiempo de Caudal Pico (min)		Tiempo de Retardo del Caudal Pico (min)
			Techo Convencional	Techo Verde	
2	59.4	10	1.3	11.3	10.0
		15	2.0	11.3	9.3
		20	1.0	11.3	10.3
5	67.6	10	1.7	11.3	9.6
		15	1.0	11.3	10.3
		20	1.3	11.3	10.0
10	74.6	10	1.7	11.3	9.6
		15	1.0	11.3	10.3
		20	1.7	11.3	9.6

Finalmente, al analizar el almacenamiento de volúmenes de agua de lluvia en cada techo, el ensayo experimental mostró que el techo verde retiene una porción del volumen de agua en su sistema de capas. Los volúmenes captados por los techos se obtuvieron como el área bajo la gráfica de cada hidrograma. Los resultados de la reducción de volúmenes de agua se muestran en la tabla 42, donde se observa que se dan reducciones que van de 25 a 68 %. Estos resultados muestran porcentajes similares a la investigación realizada por Berndtsson (2010) que obtiene valores entre 27 % a 61 %. Y Locatelli et al. (2014) que obtiene valores entre 45 % y 78 % de reducción del volumen.

Tabla 42: Reducción del volumen total

Periodo de retorno (año)	Intensidad (mm/h)	Pendiente (%)	Volumen Total (l)		Reducción del Volumen Total (%)
			Techo Convencional	Techo Verde	
2	59.4	10	66.0	29.4	55%
		15	67.5	32.8	51%
		20	75.6	23.9	68%
5	67.6	10	80.8	52.4	35%
		15	79.3	44.1	44%
		20	77.8	27.6	65%
10	74.6	10	86.2	49.6	42%
		15	90.3	38.0	58%
		20	87.7	30.4	65%

### 7.3. RESULTADOS DEL MODELAMIENTO EN HEC-RAS 2D

Del modelamiento numérico realizado y detallado en el capítulo anterior, se obtuvieron resultados de huellas de inundación, tirantes de agua, velocidades de agua e hidrogramas de escorrentía en distintos puntos de interés para el estudio. Estos resultados corresponden a cada uno de los escenarios planteados, siendo un total de 18 escenarios procesados, 9 para los techos verdes y 9 para los techos convencionales; donde para cada uno se consideran 3 tormentas de diseño y 3 pendientes de los techos.

Los resultados principales y de interés para el estudio se centran en los hidrogramas de escorrentía aguas abajo de la cuenca urbana, haciendo énfasis en la variación que tienen estos hidrogramas en techos verdes y techos convencionales, para identificar que influencia tienen estos a nivel de la cuenca urbana.

Los gráficos de huellas de inundación para los 18 escenarios propuestos se muestran con mayores detalles en el Anexo M. Mapas de inundación para los 18 escenarios del modelamiento en HEC-RAS 2D.

### 7.3.1. Resultados de simulación

De manera particular a continuación se muestra el resultado para el escenario P20T10TC (pendiente de techos del 20 %, periodo de retorno de 10 años, sistema de techo convencional), donde se muestran los puntos de análisis comparativos de los hidrogramas de escorrentía aguas debajo de la cuenca urbana para los distintos escenarios.

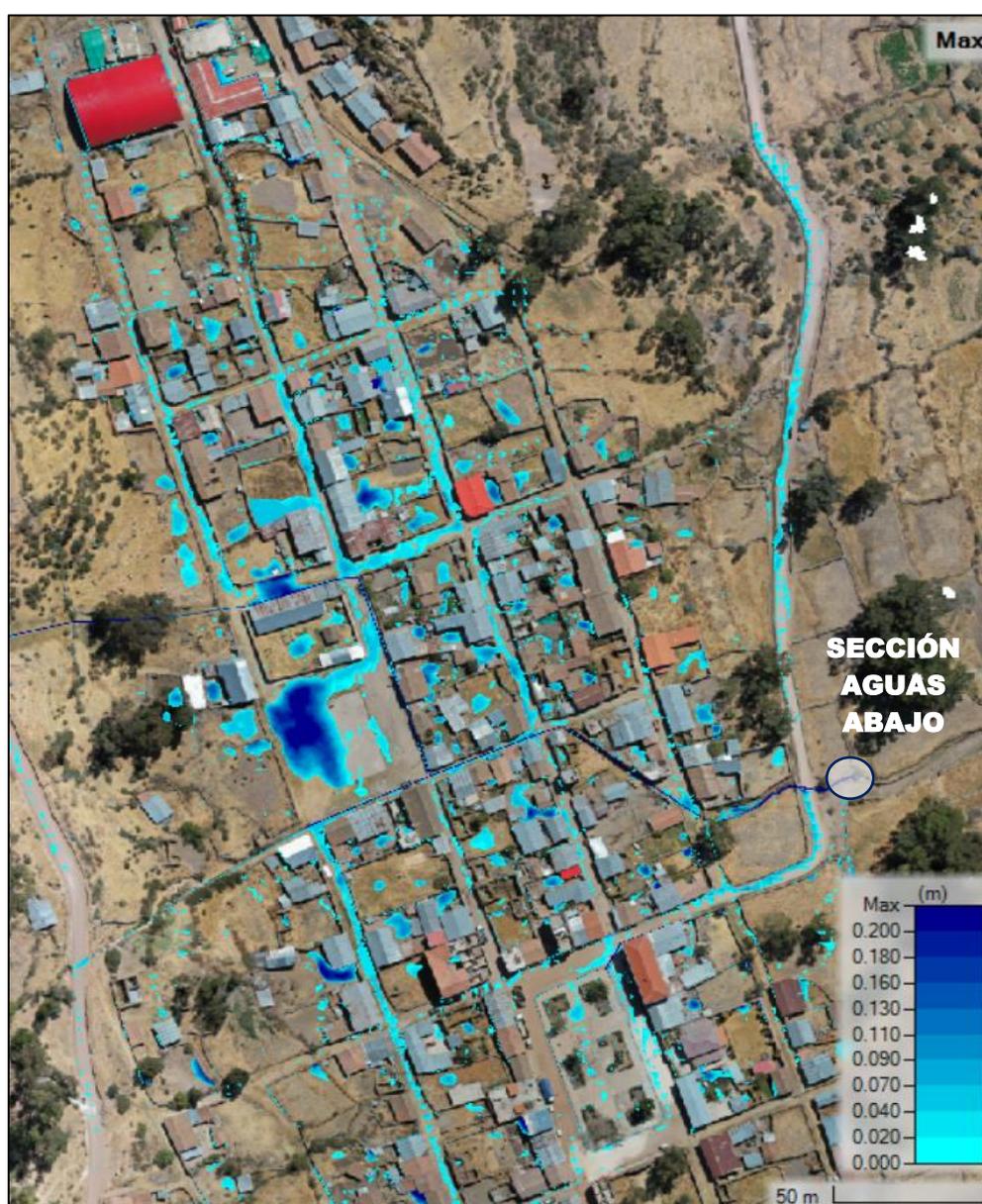


Figura 71: Sección para el análisis de hidrogramas de la cuenca urbana

Se tomó en consideración una sección para medir los hidrogramas de escorrentía aguas abajo de la cuenca urbana, para realizar el análisis comparativo entre techos verdes y techos convencionales. La ubicación de la sección fue seleccionada debido a es la principal colectora de las aguas pluviales de gran parte de la cuenca urbana.

7.3.1.1. Hidrogramas de escorrentía

La sección indicada en la figura 72, corresponde al canal principal que desagua el agua pluvial de la cuenca urbana, ya que sus áreas de aporte son de mayor tamaño, así como también se pudo identificar que tiene influencia del mayor porcentaje de viviendas, lo cual indicia que es en esta sección que se verá con mejor detalle la influencia que tienen los techos verdes en la reducción de escorrentía. Esta sección se detalla en la siguiente fotografía.



Figura 72: Sección de análisis de hidrogramas de escorrentía

Para la sección se obtuvo los hidrogramas de escorrentía para los distintos escenarios, a continuación, se muestran los resultados para un periodo de retorno de 10 años, para cada de las pendientes de techo modeladas.

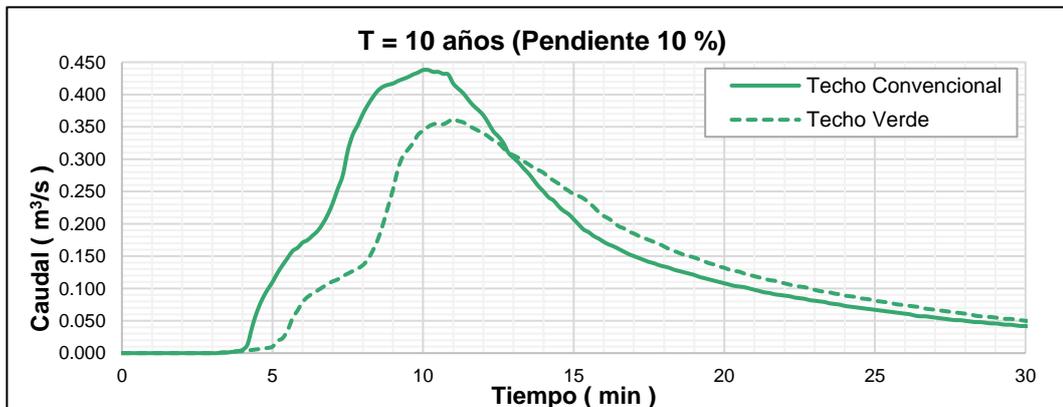


Figura 73: Hidrograma para Periodo de Retorno 10 años y Pendiente 10 %

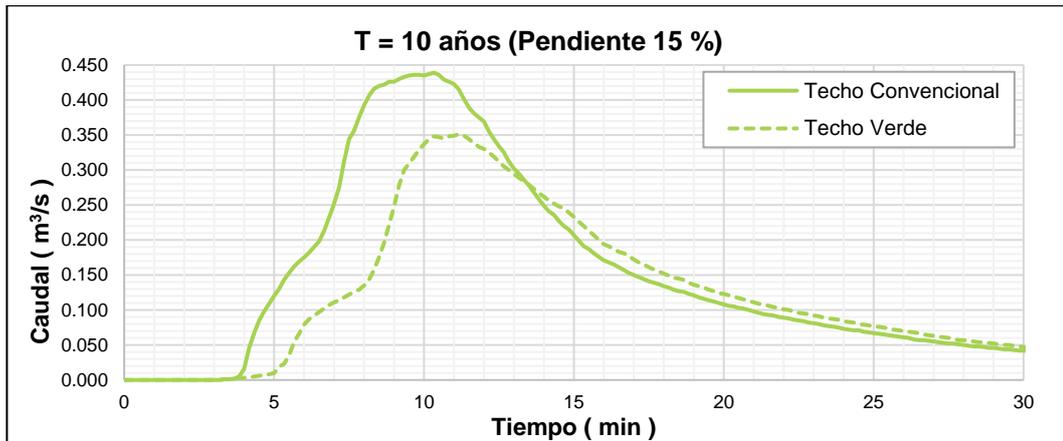


Figura 74: Hidrograma para Periodo de Retorno 10 años y Pendiente 15 %

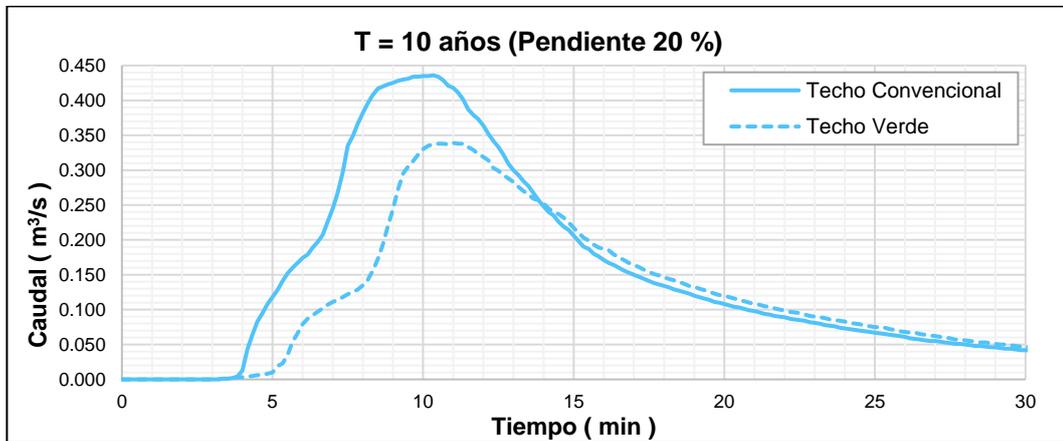


Figura 75: Hidrograma para Periodo de Retorno 10 años y Pendiente 20 %

Además, se obtuvieron resultados para un escenario de periodo de retorno de 5 años y para las tres pendientes de techo como se detalla a continuación:

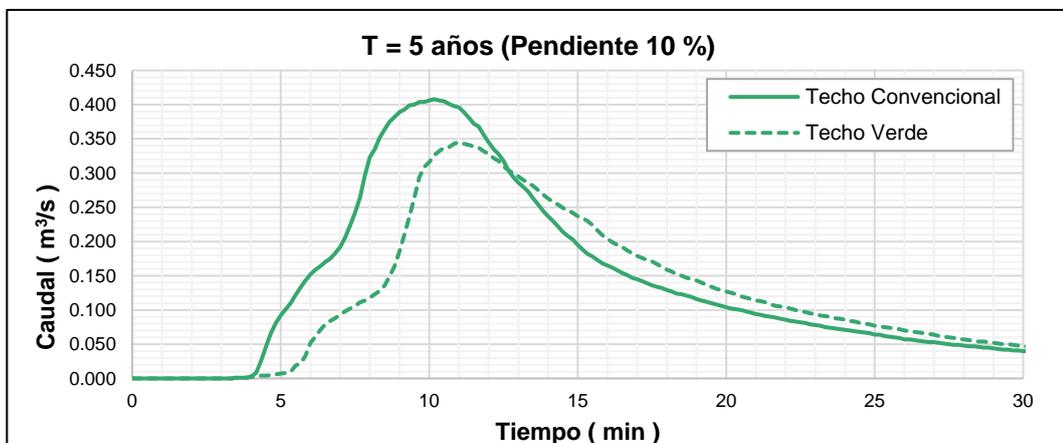


Figura 76: Hidrograma para Periodo de Retorno 5 años y Pendiente 10 %

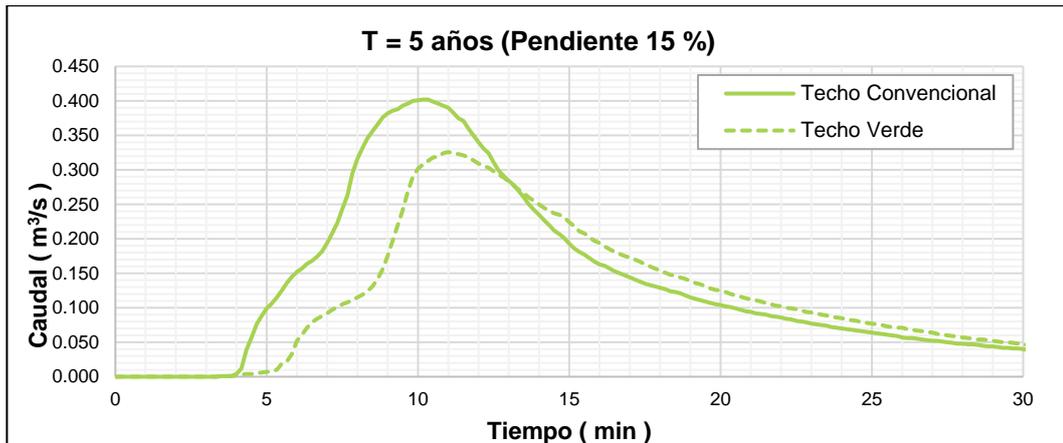


Figura 77: Hidrograma para Periodo de Retorno 5 años y Pendiente 15 %

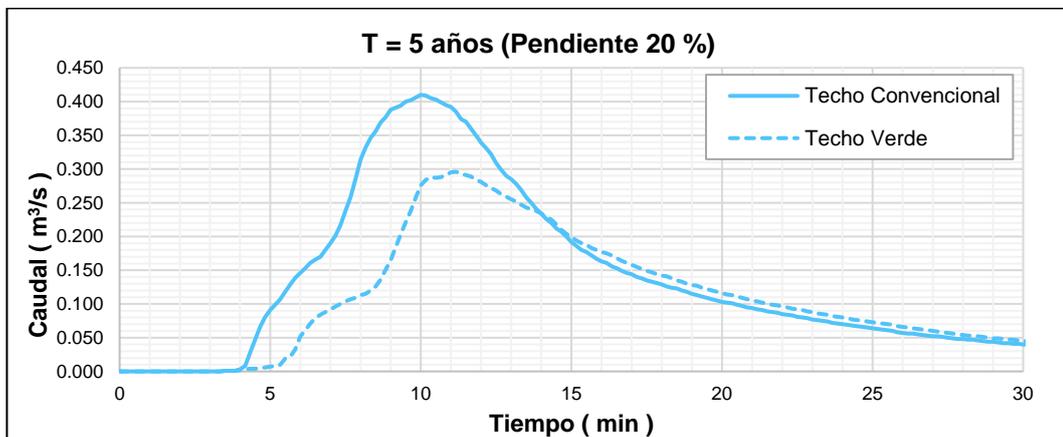


Figura 78: Hidrograma para Periodo de Retorno 5 años y Pendiente 20 %

Finalmente, se obtuvieron resultados para un escenario de periodo de retorno de 2 años y para las tres pendientes de techo como se detalla a continuación:

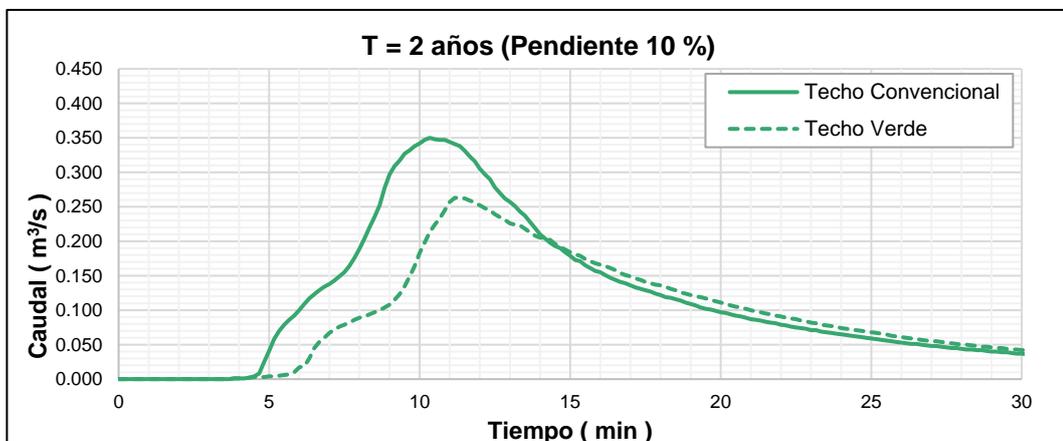


Figura 79: Hidrograma para Periodo de Retorno 2 años y Pendiente 10 %

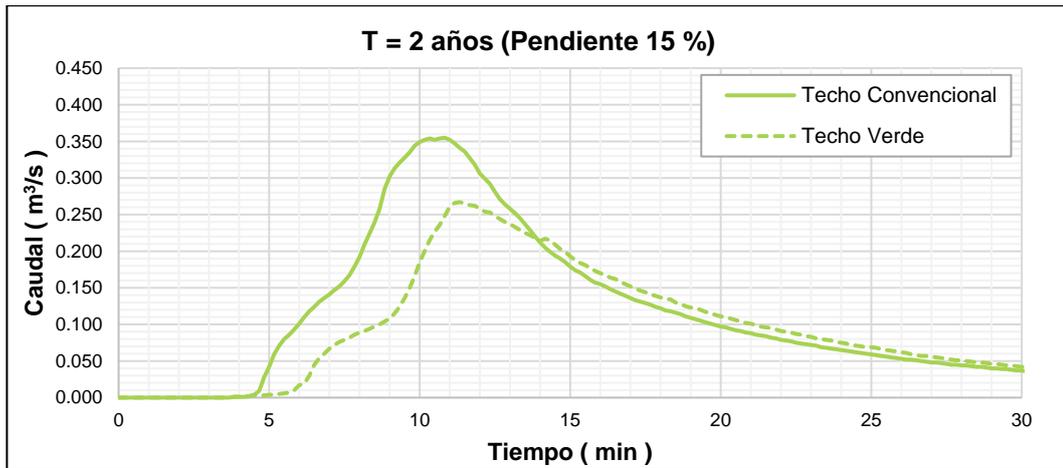


Figura 80: Hidrograma para Periodo de Retorno 2 años y Pendiente 15 %

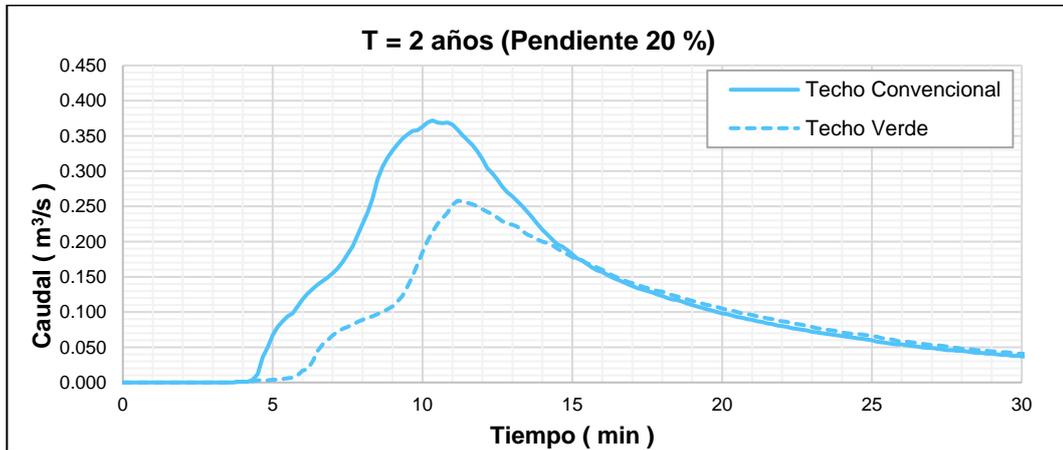


Figura 81: Hidrograma para Periodo de Retorno 2 años y Pendiente 15 %

De los resultados mostrados en los gráficos anteriores, donde se muestran los hidrogramas de escorrentía aguas debajo de la cuenca urbana, se observa una diferencia entre los hidrogramas de los techos convencionales y techos verdes. Los techos verdes muestran una reducción y retardo del caudal pico para todos los escenarios modelados (para las tres intensidades de precipitación y tres pendientes de techos).

A continuación, se muestra cuadros comparativos de la reducción del caudal pico, retardo del caudal pico y reducción del volumen de escorrentía se muestra a continuación.

En la tabla 43 se detalla el porcentaje de reducción del caudal pico en los techos verdes en comparación a los techos convencionales, que oscila entre 17 % a 31 %. Los resultados muestran relación con investigaciones realizadas por Ercolani

et al., (2018) quienes obtuvieron una reducción del caudal pico que oscila entre 10 % a 80 %, para periodo de retorno de 2 años.

Tabla 43: Reducción del caudal pico

Periodo de Retorno (año)	Intensidad (mm/h)	Pendiente (%)	Caudal Pico (m <sup>3</sup> /s)		Reducción del Caudal Pico (%)	Reducción Promedio del Caudal Pico (%)
			Techo Convencional	Techo Verde		
2	59.4	10%	0.350	0.263	25%	27%
		15%	0.355	0.267	25%	
		20%	0.372	0.258	31%	
5	67.6	10%	0.408	0.345	15%	21%
		15%	0.402	0.326	19%	
		20%	0.410	0.296	28%	
10	74.6	10%	0.438	0.362	17%	20%
		15%	0.439	0.351	20%	
		20%	0.436	0.339	22%	

En la tabla 44 se detalla el porcentaje de reducción del caudal pico en los techos verdes en comparación a los techos convencionales, que oscila entre 0.5 a 1.17 min.

Tabla 44: Tiempo de retardo del caudal pico

Periodo de Retorno (año)	Intensidad (mm/h)	Pendiente (%)	Tiempo de Caudal Pico (min)		Tiempo de Retardo del Caudal Pico (min)	Tiempo de retardo promedio del Caudal Pico (min)
			Techo Convencional	Techo Verde		
2	59.4	10%	10.3	11.2	0.83	0.72
		15%	10.8	11.3	0.50	
		20%	10.3	11.2	0.83	
5	67.6	10%	10.2	11.0	0.83	0.94
		15%	10.2	11.0	0.83	
		20%	10.0	11.2	1.17	
10	74.6	10%	10.0	11.0	1.00	0.83
		15%	10.3	11.2	0.83	
		20%	10.3	11.0	0.67	

En la tabla 44 se detalla el porcentaje de reducción del volumen en los techos verdes en comparación a los techos convencionales, que oscila entre 10 a 23 %.

Los resultados muestran relación con investigaciones realizadas por Ercolani et al., (2018) quienes obtuvieron una reducción de la tasa del volumen que oscila entre 15 % a 70 %, para un periodo de retorno de 2 años.

Cabe mencionar que los volúmenes se determinaron como el área bajo la gráfica de los hidrogramas de techos convencionales y techos verdes; y su reducción la diferencia de estos valores.

Tabla 45: Reducción del volumen total

Periodo de retorno (año)	Intensidad (mm/h)	Pendiente (%)	Volumen Total (m <sup>3</sup> )		Reducción del Volumen Total (%)	Reducción Promedio del Volumen Total (%)
			Techo Convencional	Techo Verde		
2	59.4	10%	230.9	193.4	16%	18%
		15%	232.8	196.7	16%	
		20%	243.6	187.7	23%	
5	67.6	10%	274.1	247.2	10%	14%
		15%	272.2	238.3	12%	
		20%	271.2	221.5	18%	
10	74.6	10%	294.9	265.6	10%	14%
		15%	300.1	253.7	15%	
		20%	297.7	246.4	17%	

En promedio se tiene para cada uno de los periodos de retorno los siguientes resultados de reducción de escorrentía pluvial abajo de la cuenca urbana.

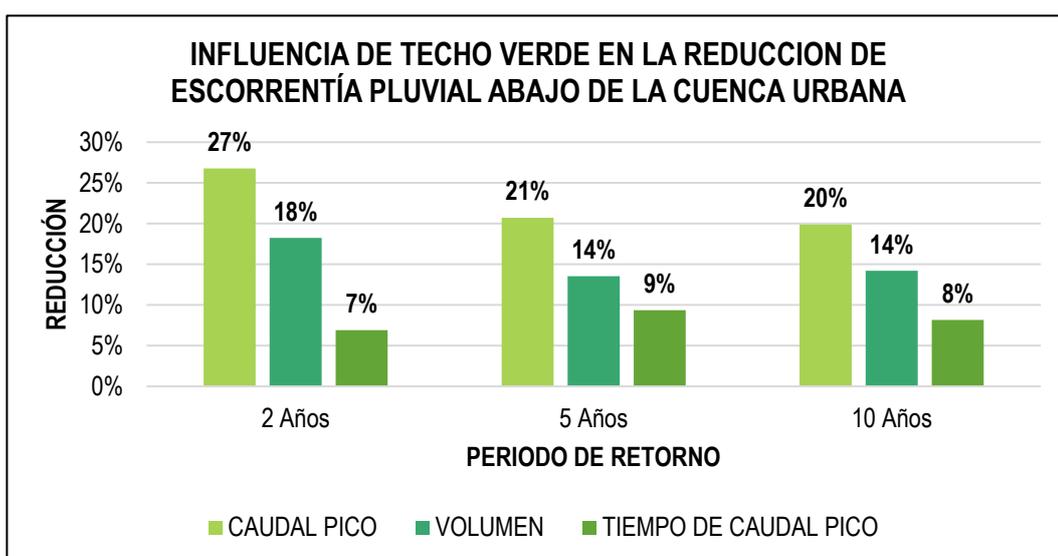


Figura 82: Influencia de techo verde en la reducción de escorrentía pluvial

Los resultados del modelamiento hidráulico e hidrológico a nivel de la cuenca urbana que ha sido implementada con techos verdes en un 17.3 % de toda la cuenca urbana (representada por toda la vivienda de la cuenca de estudio); muestra en los hidrogramas de escorrentía en la sección de análisis, una reducción del caudal pico en promedio que va desde 20 % a 27 %, un retardo de la llegada del caudal pico en promedio de 7 % a 9 % (0.72 min a 0.94 min); y una reducción del volumen en promedio que va desde 14 % a 18 %.

## CONCLUSIONES

Se determinaron las tormentas de diseño correspondientes a 2, 5 y 10 años de periodo de retorno a partir de las curvas IDF elaboradas con información histórica de la estación pluviométrica Paucaray (SENAMHI). Para periodos de retorno de 2, 5 y 10 años, y duraciones de 10 minutos de tormenta se obtuvieron las intensidades de 57 mm/h, 67 mm/h y 74 mm/h respectivamente.

Se modernizó un simulador de lluvias con capacidad de recrear tormentas características de la zona de estudio que van de 53.2 mm/h a 73.8 mm/h. En específico, se logró simular tormentas de 59.4 mm/h, 67.6 mm/h y 74.6 mm/h con errores relativos de 0.5 %, 0.1 % y 1.0 % respectivamente.

Las tormentas simuladas de 59.4 mm/h, 67.6 mm/h y 74.6 mm/h cumplen las condiciones estándares de simulación de una lluvia natural dado que los coeficientes de uniformidad de Christiansen están alrededor de 69, 70 y 71 % respectivamente. Además, el tamaño de gotas de lluvia generados para las tormentas indicadas tiene diámetros medios de 2.30 mm a 2.52 mm que corresponden a una lluvia natural.

De los hidrogramas experimentales obtenido en los ensayos realizados, se observó una reducción considerable del caudal pico, valores que varían entre 27 % a 53 % (para una intensidad de 59.4 mm/h), 25 % a 40 % (para una intensidad de 67.6 mm/h), y 20 % a 46 % (para una intensidad de 74.6 mm/h); al comparar el techo verde en condiciones húmedas respecto a un techo convencional, y bajo condiciones de exposición a luz solar. En general, se observó que la mayor reducción del caudal pico ocurre cuando la intensidad de lluvia es 59.4 mm/h y la pendiente es 20 %, generando una reducción de 53 %. Y la menor reducción se da para la intensidad de 74.6 mm/h y una pendiente de 10 %, generando una reducción del 20 %.

Además, se evidenció un retardo del caudal pico, entre 9.3 y 10.3 minutos (para una intensidad de 59.4 mm/h), 9.6 a 10.3 minutos (para una intensidad de 67.6 mm/h), y 9.6 a 10.3 minutos (para una intensidad de 74.6 mm/h). Se observó que el tiempo del caudal pico del techo verde se da a los 11.3 minutos desde el inicio de la lluvia artificial, para el total de las intensidades; y el caudal pico del techo convencional se dan a los primeros minutos que van desde 1 a 2 minutos. El

promedio del tiempo de retardo del caudal pico para todas las intensidades es de 9.9 minutos.

Finalmente, del análisis del volumen de escorrentía en los hidrogramas se observó una reducción para todos los casos, valores que van entre 51% a 68 % (para una intensidad de 59.4 mm/h), 35 % a 65 % (para una intensidad de 67.6 mm/h), y 42 % a 65 % (para una intensidad de 74.6 mm/h). En general, se observó que la mayor reducción del volumen para la intensidad de 59.4 mm/h y una pendiente de 20 %, generando una reducción de 68 %. Y la menor reducción se da para la intensidad de 67.6 mm/h y una pendiente de 10 %, generando una reducción del 25 %. Es importante indicar que el volumen que no genera escorrentía es retenido en el sustrato del techo verde.

En resumen, de los hidrogramas experimentales obtenidos en los ensayos del LNH, los resultados muestran una respuesta esperada en el techo verde con una reducción del caudal pico de hasta 53 %, un retardo del tiempo de llegada del caudal pido de hasta 10.3 minutos, y una reducción de volumen de hasta 68 %. De esta manera los techos verdes han demostrado ser una gran alternativa técnicas para mitigar los problemas generados por volúmenes de escorrentía pluvial esto a nivel de los hidrogramas de techos experimentales obtenidos en el LNH.

El modelamiento HEC-RAS 2D ha permitido realizar la simulación hidrológica e hidráulica de la cuenca urbana, lo cual ha permitido determinar adecuadamente los hidrogramas de escorrentía pluvial aguas abajo de la cuenca urbana en estudio de la ciudad altoandina San Pedro de Larcay.

La calibración del modelo HEC-RAS 2D en una cuenca urbana-rural es compleja debido a la diversidad de coberturas y depende de los valores que se le asignó a los parámetros (rugosidad, permeabilidad y número de curva). Debido a la falta de información de hidrogramas y o caudales de registro la forma más sencilla de calibrar el modelamiento es midiendo el nivel de agua y determinando el caudal en un punto de control. Para el caso de este estudio se realizó la calibración de esta forma obteniéndose un error relativo de 1.5 % lo cual es considerado aceptable para las condiciones de estudio.

De los resultados de los hidrogramas en el punto de control de la cuenca urbana se observó una reducción considerable del caudal pico, valores que van entre 25 % a 31 % (para una intensidad de 59.4 mm/h), 15 % a 28 % (para una intensidad

de 67.6 mm/h), y 17 % a 22 % (para una intensidad de 74.6 mm/h); al comparar la cuenca urbana con viviendas implementadas de techo verde con respecto a viviendas con techo convencional. En promedio para una intensidad de 59.4 mm/h se redujo el caudal pico en 27 %; para una intensidad de 67.6 mm/h, en 21% y para una intensidad de 74.6 mm/h, en 20 %.

Además, se evidenció un retardo del caudal pico, que van de 0.50 a 0.83 minutos (para una intensidad de 59.4 mm/h), 0.83 a 1.17 minutos (para una intensidad de 67.6 mm/h), y 0.67 a 1.00 minutos (para una intensidad de 74.6 mm/h). En promedio para una intensidad de 59.4 mm/h se retardo la llegada del caudal pico en 0.72 minutos; para una intensidad de 67.6 mm/h, en 0.94 minutos y para una intensidad de 74.6 mm/h, en 0.83 minutos.

Del análisis del volumen de escorrentía se observó una reducción para todos los casos, valores que van entre 16 % a 23 % (para una intensidad de 59.4 mm/h), 10 % a 18 % (para una intensidad de 67.6 mm/h), y 10 % a 17 % (para una intensidad de 74.6 mm/h). En promedio para una intensidad de 59.4 mm/h se redujo el volumen de escorrentía en 18 %; para una intensidad de 67.6 mm/h, en 14 % y para una intensidad de 74.6 mm/h, en 14 %.

Finalmente, los resultados muestran que los hidrogramas de respuesta obtenidos son diferentes, confirmando una respuesta esperada en el techo verde con una reducción del caudal pico de hasta 31 %, en el tiempo de retardo de hasta 1.17 minutos, y una reducción de volumen de hasta 23 %. De esta manera los techos verdes han demostrado ser una gran alternativa técnicas para mitigar los problemas generados por volúmenes de escorrentía pluvial esto a nivel de los hidrogramas debajo de la cuenca urbana obtenido del modelamiento en HEC-RAS 2D.

## RECOMENDACIONES

Los techos verdes son han demostrado ser un sistema que gestiona adecuadamente las aguas pluviales (SUDS), además que tiene distintos beneficios, siendo una gran alternativa de construcción en viviendas sobre todo para zonas rurales sin sistemas de drenaje pluvial.

Es importante para una implementación adecuada de techos verdes, realizar una adecuada elección de los distintos componentes en base a las condiciones ambientales, económicas, constructivas donde se quiere implementar los techos verdes.

Para futuros estudios donde se requiera estudiar intensidades mayores a las capacidades del simulador, se recomienda reducir el espaciamiento de las boquillas de aspersion, o incrementar el número de estos, lo que permitirá un incremento sustancial de la intensidad; además, incrementará el coeficiente de uniformidad de Christiansen. Sin embargo, para un incremento del número de boquillas ha de ser necesario un sistema de bombeo adicional al existente. Además de ello es importante, tomar en cuenta la altura sobre la plataforma a la cual se ubican las boquillas, dado que una variación de esta influye en la uniformidad. Es importante tomar las medidas de gránulos de harina con balanzas de alta precisión, debido a la ligereza que estos presentan.

Es recomendable que el simulador de lluvias sea capaz de recrear hietogramas de lluvias completos, eso mejorará la representación del evento y generará hidrogramas de escorrentía más precisos.

Para futuros estudios de modelamiento de cuencas urbanas teniendo como datos de entrada hidrogramas de escorrentía experimentales, realizar un adecuado escalamiento del área experimental al área de la zona urbana a modelar. Para el escalamiento es importante tomar en cuenta no solo el área de techo, sino las forma, pendiente y condiciones similares a una cuenca urbana, ya que su comportamiento es similar a esta.

Para futuras investigaciones es importante la construcción de un prototipo de techos verdes en la zona de estudio, para verificar los resultados obtenidos en laboratorio.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alvarado, J. I., & Jara, M. K. (2020). *Estudio comparativo de materiales convencionales y de origen natural en la construcción de prototipos para techos verdes extensivos en la ciudad de Cajamarca, 2020* [Tesis de pregrado, Universidad Privada del Norte]. <https://hdl.handle.net/11537/24703>
- Alvarez, G. F., & Moreno, C. A. (2021). *Modelamiento hidráulico para el control y prevención de inundaciones mediante el uso de HEC-RAS 2D en la zona urbana del río Piura* [Tesis de pregrado, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas]. <http://hdl.handle.net/10757/656880>
- Amagua, J. M., & Huayracocha, C. G. (2021). *Evaluación del impacto de techos verdes en la mitigación de volúmenes de escorrentía en el drenaje urbano mediante modelos hidrológicos* [Tesis de pregrado, Universidad Politécnica Salesiana sede Quito]. <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/19985>
- Arone, J., Arancibia, A. L., & Kuroiwa, J. M. (2023a). Analysis of the Influence of Green Roofs in the reduction of the stormwater runoff hydrograph of a high Andean city in Ayacucho, Peru. In 21st LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology. <https://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2023.1.1.1452>
- Arone, J., Torres, O. B., Arancibia, A. L., & Kuroiwa, J. M. (2023b). Retrofitting of a Rainfall Simulator to Evaluate Hydrologic Output of SUDS. In International Low Impact Development Conference 2023 (pp. 229-242). <https://doi.org/10.1061/9780784485002.020>
- Aparicio, F. J. (1992). *Fundamentos de Hidrología de Superficie*. (1a ed.). Editorial Limusa, S. A. de C. V.
- American Society for Testing and Materials. (2016). *Standards Guide for Vegetative (Green) Roof Systems (E2777-20)*.
- Baryła, A., Karczmarczyk, A., Brandyk, A., & Bus, A. (2018). The influence of a green roof drainage layer on retention capacity and leakage quality. *Water Science and Technology*, 77(12), 2886-2895. <https://doi.org/10.2166/wst.2018.283>

- Berndtsson, J. C. (2010). Green roof performance towards management of runoff water quantity and quality: A review. *Ecological engineering*, 36(4), 351-360. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2009.12.014>
- Cáceres, R. (2008). *Diseño y construcción de un modelo de simulación de lluvias para investigación de pérdida de suelos* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería]. <http://cybertesis.uni.edu.pe/handle/uni/2940>
- Centeno, A. J. (2021). *Evaluación de sistemas de regulación de temperatura en viviendas rurales diseñadas para mitigar las consecuencias del frío* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería]. <http://cybertesis.uni.edu.pe/handle/uni/21265>
- Chavez, L. S. (2020). *Uso de plásticos reciclados y su influencia en la construcción de techos verdes para viviendas de material rústico en el barrio de Ocopilla, distrito de Huancayo al 2019* [Tesis de pregrado, Universidad Continental]. <https://hdl.handle.net/20.500.12394/8254>
- Chow, V. T. (1994). *Hidráulica de Canales Abiertos*. Mc Graw-Hill Interamericana, S. A.
- Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1994). *Hidrología Aplicada*. Mc Graw-Hill Interamericana, S. A.
- Comunidad de Larcay. (2022). LARCAY – SUCRE – AYACUCHO - PERÚ, MAJESTUOSO [Publicación]. <https://www.facebook.com/photo?fbid=419227289969403&set=pcb.419227323302733>
- Contreras, E., & Castillo, I. (2015). *Guía de azoteas vivas y cubiertas verdes*. Área de Ecología Urbana, Ayuntamiento de Barcelona. <https://media-edg.barcelona.cat/wp-content/uploads/2016/02/Guia-terrats-CAST-baixa.pdf>
- De Cuyper, K., Dinne, K., & Van de Vel, L. (2005). Rainwater discharge from green roofs. *Plumbing Systems and Design*, Nov/Dec, 10-15.
- Ercolani, G., Chiaradia, E. A., Gandolfi, C., Castelli, F., & Masseroni, D. (2018). Evaluating performance of green roofs for stormwater runoff mitigation in a high flood risk urban catchment. *Journal of Hydrology*, 556(2018), 830-845. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.09.050>

- Esteves, A. (2016). Propuesta de gestión ambiental para la implementación de una línea de servicios “techos verdes” en la empresa “Lombrisa” Lambayeque – Perú, 2016. *Yachaq*, 1(1).
- Forschungsgesellschaft Landesentwicklung, Landespflege. (2018). *Green Roof Guidelines: Guidelines for the Planning, Construction and Maintenance of Green Roofing*. (6a ed.). Editorial Board.
- Gómez, M. (2007). *Hidrología Urbana*. Flumen.
- International Green Roof Association. (2018). *Green Roof Policies - Manual for decision makers and green roof supporters* (1a ed.). International Green Roof Association e. V.
- Instituto Nacional de Estadística e Informática. (2018). *Ayacucho - Resultados Definitivos. Censos Nacionales 2017*.  
[https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones\\_digitales/Est/Lib1568/05TOMO\\_01.pdf](https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1568/05TOMO_01.pdf)
- Instituto Nacional de Estadística e Informática. (2018). *Directorio Nacional de Centros Poblados. Censos Nacionales 2017*.  
[https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones\\_digitales/Est/Lib1541/index.htm](https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1541/index.htm)
- Kim, H., Ko, T., Jeong, H., & Ye, S. (2018). The development of a methodology for calibrating a large-scale laboratory rainfall simulator. *Atmosphere*, 9(11), 427. <https://doi.org/10.3390/atmos9110427>
- León, E. A., & Avellaneda, P. M. (2014, agosto). *Desempeño de cubiertas verdes como sistema de drenaje urbano sostenible*. XXV Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Santiago, Chile.
- Lindao, M. (2018). *Diseño y fabricación de prototipo de banco de pruebas portátil para medidores de agua potable* [Tesis de pregrado, Universidad de Piura].  
<https://hdl.handle.net/11042/3654>
- Laboratorio Nacional de Hidráulica. (2023). *Laboratorio Nacional de Hidráulica – Universidad Nacional de Ingeniería*. <https://lnh.uni.edu.pe/>
- Locatelli, L., Mark, O., Mikkelsen, P. S., Arnbjerg-Nielsen, K., Jensen, M. B., & Binning, P. J. (2014). Modelling of green roof hydrological performance for

- urban drainage applications. *Journal of hydrology*, 519, 3237-3248.  
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.10.030>
- López, N. A., Barreto, W. J., Rodríguez, E. D., & Romero, J. R. (2020). Evaluación del impacto de un techo verde sobre la escorrentía urbana usando un modelo a escala. *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería Universidad del Zulia*, Especial (1), 26-34. <https://doi.org/10.22209/rt.ve2020a04>
- López, N., Barreto, W., & Méndez, N. (2015). Techos verdes como solución al problema de inundaciones en medios urbanos. *Revista Gaceta Técnica*, 14 (1), 9-21.
- Lucero, J. B. (2020). *Implementación de techo verde como sistema pasivo en viviendas rurales altoandinas para el desarrollo de políticas públicas* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería]. <http://hdl.handle.net/20.500.14076/21725>
- Luengas, D. J., & De La Rosa, S. F. (2015). *Diseño y Construcción de un simulador de lluvia para estudios hidrológicos* [Tesis de pregrado, Universidad Distrital Francisco José de Caldas]. <http://hdl.handle.net/11349/4715>
- Ministerio de Economía y Finanzas. (2023). *Indicadores de Brechas*. *Invierte.pe*. <https://ofi5.mef.gob.pe/brechas/Dashboard/DashboardSectoros>
- Melbourne Water. (2013). *Stormwater Strategy: A Melbourne Water strategy for managing rural and urban runoff*. Melbourne Water. [https://www.melbournewater.com.au/sites/default/files/2017-10/Stormwater-strategy\\_0.pdf](https://www.melbournewater.com.au/sites/default/files/2017-10/Stormwater-strategy_0.pdf)
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2011). *Manual de Hidrología, Hidráulica y Drenaje*. [http://transparencia.mtc.gob.pe/idm\\_docs/normas\\_legales/1\\_0\\_2950.pdf](http://transparencia.mtc.gob.pe/idm_docs/normas_legales/1_0_2950.pdf)
- Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. (2021). *Norma Técnica CE.040 Drenaje Pluvial del Reglamento Nacional de Edificaciones*. <https://www.gob.pe/institucion/vivienda/informes-publicaciones/2309793-reglamento-nacional-de-edificaciones-rne>
- Monge, J., & Aguilar, J. F. (2008). *Manual de operación del simulador de lluvia para la cuantificación de la infiltración, escorrentía y erosión de suelos*. Universidad de Costa Rica.

- Ngasoh, F. G., Mbajjorgu, C. C., Kamai, M. B., & Okoro, G. O. (2020). A Revisit of Rainfall Simulator as a Potential Tool for Hydrological Research. *Agrometeorology*. London, UK: IntechOpen. <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.93532>
- Orellana, R. E. (2021). *Modelamiento hidrológico e hidráulico para el análisis de inundaciones en la ciudad de Piura utilizando HEC-RAS* [Tesis de pregrado, Pontificia Universidad Católica del Perú]. <http://hdl.handle.net/20.500.12404/18304>
- Pavco Wavin. (2021). *Sistemas de Impermeabilización, Geomembranas*. <https://pavcowavingeosinteticos.com/geomembrana-hdpe/>
- Pérez, G. (2015). *Experiencias en el monitoreo continuo de techos verdes modulares extensivos* [Tesis de maestría, Universidad de los Andes]. <http://hdl.handle.net/1992/13184>
- Portuguez, M., & Verano, C. (2016). Generation of curve number map with geographical information system. *Apuntes de Ciencia & Sociedad*, 6(1). <http://dx.doi.org/10.18259/acs.2016029>
- Comisión de Promoción del Perú para la Exportación y el Turismo. (2019). *Marca Perú: Las 8 regiones naturales del Perú*. <https://peru.info/es-pe/turismo/noticias/3/16/estas-son-las-8-regiones-naturales-del-peru>
- Rey, D. M. (2019). *Propuesta de sistema de drenaje urbano sostenible para cuencas de montaña con alta pendiente* [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia]. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/76582>
- Roth, G. A. (2003). *Meteorología*. Omega
- Toxement. (2018). *Guía básica para la instalación de techo vegetal*. Euclid Group. [https://www.toxement.com.co/media/3510/spec\\_techos\\_vegetales.pdf](https://www.toxement.com.co/media/3510/spec_techos_vegetales.pdf)
- Trapote, A. (2016). Gestión de las aguas pluviales en entornos urbanos mediante técnicas de drenaje sostenible. *Journal of Engineering and Technology*, 5(2), 26-40. <http://dx.doi.org/10.22507/jet.v5n2a1>
- US Army Corps of Engineers. (2023). *HEC-RAS 2D User's Manual*. <https://www.hec.usace.army.mil/confluence/rasdocs/r2dum/6.4/introduction/hec-ras-2d-modeling-advantages-capabilities>

- Vijayaraghavan, K. (2016). Green Roofs: A critical review on the role of components, benefits, limitations and trends. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 57(2016), 740-752. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.119>
- Villón, M. (2006). *Hidrología Estadística*. Editorial Tecnológica de Costa Rica
- Yakubu, M. L., & Yusop, Z. (2017). Adaptability of rainfall simulators as research tool on urban sealed surfaces – a review. *Hydrological Sciences Journal*, 62 (6), 996-1012. <https://doi.org/10.1080/02626667.2016.1267355>
- Yana, L. A. (2018). *Estudio de drenaje pluvial para la ciudad de Cajabamba – Cajamarca utilizando los modelos hidrológicos HEC-HMS, HEC-RAS y SWMM* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería]. <http://hdl.handle.net/20.500.14076/13424>

## ANEXOS

<b>Anexo A</b>	: Mapa de uso de suelo .....	153
<b>Anexo B</b>	: Ficha técnica sustrato de crecimiento .....	155
<b>Anexo C</b>	: Ficha técnica geodren planar .....	157
<b>Anexo D</b>	: Ficha técnica de geomembrana impermeable HDPE 1 mm .....	159
<b>Anexo E</b>	: Boquilla de aspersión FullJet ¼ HH - 14WSQ .....	161
<b>Anexo F</b>	: Cálculo de potencia de bomba de succión .....	163
<b>Anexo G</b>	: Factores de conversión K para sensores de flujo .....	167
<b>Anexo H</b>	: Códigos Arduino .....	170
<b>Anexo I</b>	: Mapa de sentido de flujo de agua .....	171
<b>Anexo J</b>	: Mapa de techos convencionales .....	173
<b>Anexo K</b>	: Mapa de techos verdes .....	175
<b>Anexo L</b>	: Masas de gránulo de harina .....	177
<b>Anexo M</b>	: Mapas de inundación para los 18 escenarios del modelamiento en HEC-RAS 2D .....	180

**ANEXO A**  
**MAPA DE USO DE SUELO**

653800

653900

654000

654100

8433500

8433400

8433300

8433200

8433100

8433000

8433500

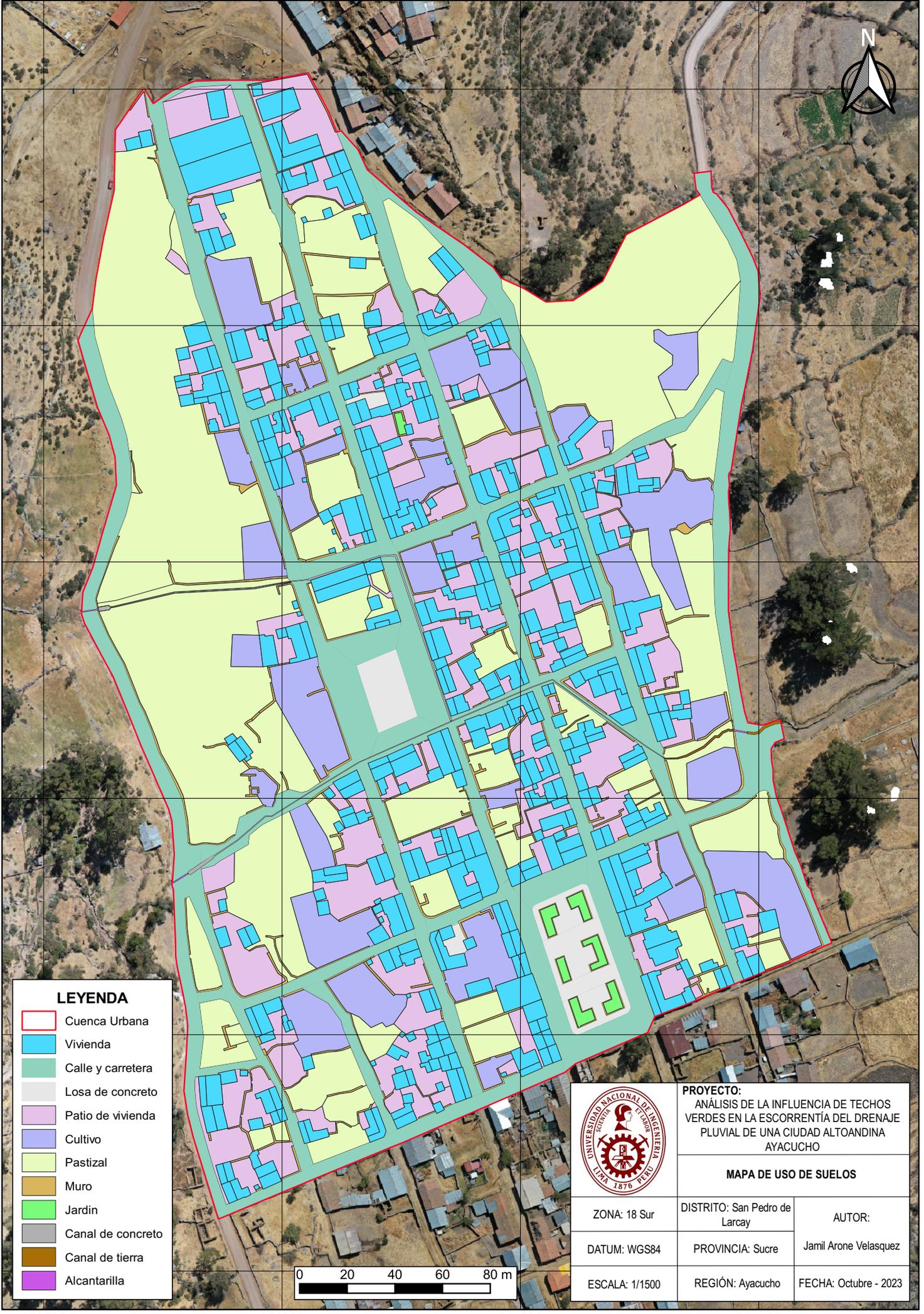
8433400

8433300

8433200

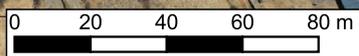
8433100

8433000



**LEYENDA**

-  Cuenca Urbana
-  Vivienda
-  Calle y carretera
-  Losa de concreto
-  Patio de vivienda
-  Cultivo
-  Pastizal
-  Muro
-  Jardin
-  Canal de concreto
-  Canal de tierra
-  Alcantarilla



**PROYECTO:**  
ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DE TECHOS VERDES EN LA ESCORRENTÍA DEL DRENAJE PLUVIAL DE UNA CIUDAD ALTOANDINA AYACUCHO

**MAPA DE USO DE SUELOS**

ZONA: 18 Sur	DISTRITO: San Pedro de Larcaj	AUTOR:
DATUM: WGS84	PROVINCIA: Sucre	Jamil Arone Velasquez
ESCALA: 1/1500	REGIÓN: Ayacucho	FECHA: Octubre - 2023

653800

653900

654000

654100

**ANEXO B**  
**FICHA TÉCNICA SUSTRATO DE CRECIMIENTO**



JARDÍN URBANO

## FICHA TÉCNICA DE SUSTRATO PREPARADO

### 1. DATOS DE LA EMPRESA

<b>RAZÓN SOCIAL:</b>	<b>JARDIN URBANO S.A.C.</b>
<b>Registro Único de Contribuyentes (RUC):</b>	20547397615

### 2. DATOS DEL SUSTRATO LIGERO:

<b>LOCACIÓN de REPRODUCCIÓN:</b>	
Vivero (Zona de Entrega) – C/ Los Canarios Mza. D2, Lte. 09. Sta. María de Huachipa – Lurigancho.	
<b>NOMBRE COMÚN:</b>	<b>FORMAS DE PRESENTACION:</b>
Sustrato preparado para techo verde	Sacos (25 lt-50 lt), BIG-BAG en M3
<b>DESCRIPCIÓN:</b>	<b>COMPOSICION:</b>
Posee un color marrón oscuro a capacidad de campo, de descomposición semilenta, compactación ligera, capacidad de retención de líquidos media. Libre de semillas de malezas y patógenos. Posee una densidad de 0.85 kg/Lt  Peso aprox. m3 es de 846 kg.	<ul style="list-style-type: none"><li>• 50% Tierra de cultivo</li><li>• 30% Cascarilla de arroz semicompostada</li><li>• 10% Compost</li><li>• 10% Arena fina lavada</li><li>• Nitrofoska 3 gr/ Lt sustrato</li></ul>

### 3. CUIDADOS Y REQUERIMIENTOS SUSTRATO LIGERO:

<b>EXPOSICIÓN:</b>	<b>USOS:</b>
Pleno sol, semi sombra y sombra	Es usado en azoteas verdes Techos verdes extensivos, semi-intensivos e intensivos.
<b>RIEGO:</b>	
La dosificación y la frecuencia de riego dependerá del tipo de planta y la fenología de la cubierta vegetal que se instalara en ese lugar  Se debe tener en cuenta para la planificación de riego que el sustrato por poseer materia orgánica en su composición retiene humedad en sus macro y microporos	
<b>MANTENIMIENTO</b>	
Reincorporación de macro y micro nutrientes para reponer los nutrientes asimilados por la planta, esto dependerá mucho del tipo de planta que se sembrara ya que cada especie absorbe una cantidad específica de nutrientes durante cada fase fisiológica ya sea en su etapa vegetativa o fase reproductiva. Se recomienda usar nitrofoska y fertilizar cada 3 meses una dosis de 3 kg/ Tn de sustrato	
<b>BENEFICIOS:</b>	
<ul style="list-style-type: none"><li>• Permite aligerar el peso des sustrato en macetas, jardineras, jardines verticales y techos verdes</li><li>• Brinda nutrientes por ser un sustrato de origen orgánico, permite un mejor aprovechamiento de los nutrientes para las plantas y agrega microorganismos beneficiosos al suelo.</li><li>• Aumenta la capacidad de intercambio catiónico</li><li>• Alta relación C/N</li><li>• Proporciona una buena estructura del suelo y por ende aumenta la aireación y retención de agua del perfil del suelo</li></ul>	



**ANEXO C**  
**FICHA TÉCNICA DEL GEODREN PLANAR**

RED DRENANTE (HDPE)			
PROPIEDADES MECÁNICAS	NORMA	UNIDAD	VALOR
<b>Espesor</b>	ASTM D5199	mm	5.8
<b>Resistencia a la compresión</b>	ASTM D1621	kPa	700
<b>Resistencia a la tensión</b>	ASTM D4595	kN/m	4.8

GEOTEXTIL NO TEJIDO DE FILTRO (PP)			
PROPIEDADES HIDRÁULICAS	NORMA	UNIDAD	VALOR
<b>Tamaño de apertura aparente</b>	ASTM D4751	mm (N°. Tamiz)	0.180 (80)
<b>Permitividad</b>	ASTM D4491	s <sup>-1</sup>	2.9
<b>Permeabilidad</b>	ASTM D4491	cm/s	46 x 10 <sup>-2</sup>
<b>Tasa de flujo</b>	ASTM D4491	l/min/m <sup>2</sup>	8109

PRESIÓN	GRADIENTE HIDRÁULICO	
	i=0.5	i=0.1
10 kPa	l/s-m	l/s-m
50 kPa	0.65	0.21
100 kPa	0.54	0.17
200 kPa	0.47	0.15
	0.27	0.09

GEOCOMPUESTO	
DIMENSIONES DEL ROLLO	
LONGITUD (m)	ALTURA (m)
50	0.5
50	1.0
50	2.0



#### CONVENCIONES:

ASTM: American Society for Testing and Materials. • N. A.: No aplica.

Operamos bajo sistemas internacionales de control de calidad; Contamos con la acreditación **GAI LAP (The Geosynthetic Institute)**.

La presente ficha técnica está vigente a partir de mayo de 2021. Nos reservamos el derecho de introducir las modificaciones de especificaciones que considere necesarias para garantizar la óptima calidad y funcionalidad de sus productos sin previo aviso. La información aquí contenida se ofrece gratis, es cierta y exacta a nuestro leal saber y entender; no obstante, todas las recomendaciones y sugerencias están hechas sin garantía, puesto que las condiciones de uso están fuera de nuestro control y es responsabilidad exclusiva del usuario. Por favor verificar los datos de esta especificación con el Departamento de Ingeniería para confirmar que la información esta vigente.

**COLOMBIA:** • Tel.: (571) 782 5000 Exts: 1518  
 • [ingenieriageosinteticos@wavin.com](mailto:ingenieriageosinteticos@wavin.com) • [www.wavin.com/es-co](http://www.wavin.com/es-co)  
**PERÚ:** • Tels.: (511) 6276038 / 6276039 • [geosperu@wavin.com](mailto:geosperu@wavin.com) • [www.wavin.com/es-pe](http://www.wavin.com/es-pe)

## ANEXO D

### FICHA TÉCNICA DE GEOMEMBRANA IMPERMEABLE HDPE 1mm

## ESPECIFICACIONES TÉCNICAS POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD HDPE

PROPIEDADES MECÁNICAS	NORMA	UNIDAD	20 MILS	30 MILS	40 MILS	60 MILS	80 MILS
<b>Resistencia a la rotura</b>	ASTM D6693 Tipo IV	N/mm	13	20	27	40	53
<b>Elongación a la rotura</b>	ASTM D6693 Tipo IV	%	500	700	700	700	700
<b>Resistencia a la fluencia</b>	ASTM D6693 Tipo IV	N/mm	7	11	15	22	29
<b>Elongación a la fluencia</b>	ASTM D6693 Tipo IV	%	12	12	12	12	12
<b>Resistencia al rasgado</b>	ASTM D1004	N	57	93	125	187	249
<b>Resistencia al punzonamiento</b>	ASTM D4833	N	160	240	320	480	640
PROPIEDADES FÍSICAS	NORMA	UNIDAD	20 MILS	30 MILS	40 MILS	60 MILS	80 MILS
<b>Espesor Nominal</b>	-	mm	0.5	0.75	1.00	1.50	2.00
<b>Espesor promedio mínimo</b>	ASTM D5199	mm	0.45	0.68	0.90	1.35	1.80
<b>Densidad</b>	ASTM D1505 / D792	g/cm <sup>3</sup>	>0.94	>0.94	>0.94	>0.94	>0.94
<b>Contenido negro de humo</b>	ASTM D1603 / D4218	%	2.0 - 3.0	2.0 - 3.0	2.0 - 3.0	2.0 - 3.0	2.0 - 3.0
<b>Tiempo de inducción a la oxidación</b>	ASTM D3895, 200 °C	Minutos	>100	>100	>100	>100	>100
<b>Envejecimiento al horno 85 °C 90 días</b>	ASTM D5721	%	>55/80	>55/80	>55/80	>55/80	>55/80
<b>Retención OIT (ASTM D3895 o D5885)</b>							
<b>Envejecimiento UltraVioleta 1600 hrs OIT retenido</b>	ASTM D5885	%	>50	>50	>50	>50	>50
PRESENTACIÓN DEL ROLLO	NORMA	UNIDAD	20 MIL S	30 MILS	40 MILS	60 MILS	80 MILS
<b>Longitud</b>	Medido	m	50 - 100 - 450	50 - 100 - 300	50 - 100 - 225	50 - 100 - 150	110
<b>Ancho</b>	Medido	m	7.01	7.01	7.01	7.01	7.01
<b>Área</b>	Calculado	m <sup>2</sup>	350,5 - 701 - 3155	350,5 - 701 - 2103	350,5 - 701 - 1577	350,5 - 701 - 1052	771

## ESPECIFICACIONES TÉCNICAS POLIETILENO ULTRAFLEXIBLE DE BAJA DENSIDAD LINEAL LLDPE

PROPIEDADES MECÁNICAS	NORMA	UNIDAD	20 MILS	30 MILS	40 MILS	60 MILS
<b>Resistencia a la rotura</b>	ASTM D6693 Tipo IV	N/mm	13	20	27	40
<b>Elongación a la rotura</b>	ASTM D6693 Tipo IV	%	800	800	800	800
<b>Resistencia al rasgado</b>	ASTM D1004	N	50	72	100	150
<b>Resistencia al punzonamiento</b>	ASTM D4833	N	127	185	225	370
PROPIEDADES FÍSICAS	NORMA	UNIDAD	20 MILS	30 MILS	40 MILS	60 MILS
<b>Espesor Nominal</b>	-	mm	0.5	0.75	1.00	1.50
<b>Espesor promedio mínimo</b>	ASTM D5199	mm	0.45	0.68	0.90	1.35
<b>Densidad</b>	ASTM D1505 / D792	g/cm <sup>3</sup>	>0.939	>0.939	>0.939	>0.939
<b>Contenido negro de humo</b>	ASTM D1603 / D4218	%	2.0 - 3.0	2.0 - 3.0	2.0 - 3.0	2.0 - 3.0
<b>Tiempo de inducción a la oxidación</b>	ASTM D3895, 200 °C	Minutos	>100	>100	>100	>100
<b>Envejecimiento al horno 85 °C 90 días</b>	ASTM D5721	%	>35/60	>35/60	>35/60	>35/60
<b>Retención OIT (ASTM D3895 o D5885)</b>						
<b>Envejecimiento UltraVioleta 1600 hrs OIT retenido</b>	ASTM D5885	%	>60	>60	>60	>60
PRESENTACIÓN DEL ROLLO	NORMA	UNIDAD	20 MILS	30 MILS	40 MILS	60 MILS
<b>Longitud</b>	Medido	m	50 - 100 - 450	50 - 100 - 300	50 - 100 - 225	50 - 100 - 150
<b>Ancho</b>	Medido	m	7.01	7.01	7.01	7.01
<b>Área</b>	Calculado	m <sup>2</sup>	350,5 - 701 - 3155	350,5 - 701 - 2103	350,5 - 701 - 1577	350,5 - 701 - 1052

**Nota:** La presentación de los rollos puede variar sin previo aviso.

**CONVENCIONES:**

ASTM: American Society for Testing and Materials. • N. A.: No aplica.

Operamos bajo sistemas internacionales de control de calidad; Contamos con la acreditación **GAI LAP (The Geosynthetic Institute)**.

La presente ficha técnica está vigente a partir de mayo de 2021. Nos reservamos el derecho de introducir las modificaciones de especificaciones que considere necesarias para garantizar la óptima calidad y funcionalidad de sus productos sin previo aviso. La información aquí contenida se ofrece gratis, es cierta y exacta a nuestro leal saber y entender; no obstante, todas las recomendaciones y sugerencias están hechas sin garantía, puesto que las condiciones de uso están fuera de nuestro control y es responsabilidad exclusiva del usuario. Por favor verificar los datos de esta especificación con el Departamento de Ingeniería para confirmar que la información esta vigente.

**MÉXICO:** • Tel.: (52 55) 5831 - 7527 • geosinteticos@wavin.com • www.wavin.com/es-mx **GUATEMALA:** • Tel.: (502) 2410 - 1301 / (502) 2410 - 1300 • www.wavin.com/es-gt **EL SALVADOR:** • Tel.: (503) 2500 - 9200/(504) 2202 - 7520/ (504) 2545 - 2400 • www.wavin.com/es-sv  
**NICARAGUA:** • Tel.: (505) 2266 - 1551 • Info.nicaragua@wavin.com • www.wavin.com/es-ni **COSTA RICA:** • Tel.: (506) 2209 - 3400  
 • Info.costarica@wavin.com • www.wavin.com/es-cr **PANAMÁ:** • Tel.: (507) 3059 - 600 • Info.panama@wavin.com • www.wavin.com/es-pa  
**ARGENTINA:** • Tel.: (54 11) 4848-8484 • geosinteticos@wavin.com • www.wavin.com/es-ar

**ANEXO E**  
**BOQUILLA DE ASPERSIÓN**  
**FullJet ¼ HH-14WSQ**

**S** PERFORMANCE DATA: **STANDARD ANGLE SPRAY**

Inlet Conn. (in.)	Nozzle Type				Capacity Size	Orifice Dia. Nom. (in.)	Max. Free Passage Dia. (in.)	Flow Rate Capacity (gallons per minute)								Spray Angle (°)		
	G-SQ	GG-SQ	HH-SQ	H-SQ				5 psi	7 psi	10 psi	20 psi	40 psi	80 psi	100 psi	150 psi	7 psi	20 psi	80 psi
1-1/4				●	177SQ	.500	.250	12.9	15.0	17.7	24	33	46	51	62	78	80	73
1-1/2				●	230SQ	.563	.344	16.7	19.5	23	32	44	60	66	80	73	77	70
2				●	290SQ	.609	.438	21	25	29	40	55	75	84	101	66	70	64
				●	360SQ	.687	.438	26	31	36	50	68	94	104	125	70	74	67
				●	480SQ	.828	.438	35	41	48	66	91	125	138	167	79	82	74
2-1/2				●	490SQ	.791	.563	36	42	49	67	93	128	141	170	62	67	61
				●	590SQ	.875	.563	43	50	59	81	112	154	170	205	75	78	71
				●	950SQ	1.125	.688	69	81	95	131	180	247	274	330	81	84	76
5				●	2980SQ	1.875	1.125	217	253	298	410	564	776	859	1036	89	91	83
6				●	5690SQ	3.219	1.750	414	483	569	783	1077	1481	1641	1977	102	105	95

Maximum Free Passage Diameter is the maximum diameter as listed of foreign matter that can pass through the nozzle without clogging.

Highlighted column shows the rated pressure.

**W** PERFORMANCE DATA: **WIDE ANGLE SPRAY**



Inlet Conn. (in.)	Nozzle Type		Capacity Size	Orifice Dia. Nom. (in.)	Max. Free Passage Dia. (in.)	Flow Rate Capacity (gallons per minute)							Spray Angle (°)		
	H-WSQ	HH-WSQ				5 psi	7 psi	10 psi	15 psi	20 psi	40 psi	80 psi	5 psi	10 psi	80 psi
1/4		●	14WSQ	.141	.063	1.0	1.2	1.4	1.7	1.9	2.6	3.5	99	101	93
3/8		●	17WSQ	.156	.063	1.3	1.5	1.7	2.0	2.3	3.1	4.2	99	101	93
		●	20WSQ	.172	.094	1.5	1.7	2.0	2.4	2.7	3.7	5.0	104	110	94
		●	24WSQ	.188	.094	1.8	2.1	2.4	2.9	3.3	4.4	6.0	104	110	94
		●	27WSQ	.203	.109	2.0	2.3	2.7	3.2	3.7	5.0	6.7	104	110	98
1/2		●	30WSQ	.219	.109	2.2	2.6	3.0	3.6	4.1	5.5	7.5	104	110	102
		●	35WSQ	.234	.125	2.6	3.0	3.5	4.2	4.7	6.4	8.7	104	110	102
		●	40WSQ	.250	.125	2.9	3.4	4.0	4.8	5.4	7.4	10.0	104	110	102
		●	45WSQ	.250	.141	3.3	3.8	4.5	5.4	6.1	8.3	11.2	104	110	102
	●	50WSQ	.266	.156	3.7	4.3	5.0	6.0	6.8	9.2	12.5	104	110	102	
3/4	●	●	71WSQ	.391	.172	5.2	6.1	7.1	8.5	9.6	13.1	17.7	105	110	102
1	●	●	130WSQ	.516	.219	9.6	11.1	13.0	15.5	17.6	24	32	107	110	107
1-1/4	●		190WSQ	.609	.219	14.0	16.2	19.0	23	26	35	47	108	111	109
1-1/2	●		290WSQ	.719	.313	21	25	29	35	39	53	72	109	114	109
2	●		560WSQ	.984	.438	41	48	56	67	76	103	140	110	114	109
2-1/2	●		830WSQ	1.250	.563	61	71	83	99	113	153	207	110	115	109
3	●		1070WSQ	1.375	.688	79	91	107	128	145	197	267	110	115	109

Maximum Free Passage Diameter is the maximum diameter as listed of foreign matter that can pass through the nozzle without clogging.

Highlighted column shows the rated pressure.



## ANEXO F

### CÁLCULO DE LA POTENCIA DE LA BOMBA DE SUCCIÓN

Del sistema de tuberías, se realizará el cálculo de la potencia de la bomba de succión, necesaria para el adecuado funcionamiento de las boquillas de aspersión:

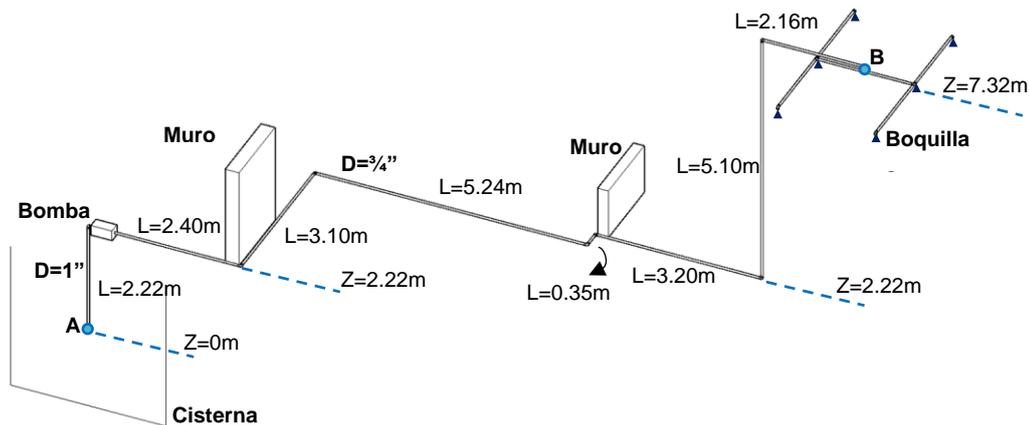


Figura 1. Esquema del sistema de aspersión

Fuente: Elaboración propia

Se aplica la ecuación de Energía (Ecuación de Bernoulli) en los puntos A y B:

$$E_A = E_B$$

$$\frac{V_A^2}{2g} + \frac{P_A}{\gamma} + Z_A + \frac{Pot}{\gamma Q} = \frac{V_B^2}{2g} + \frac{P_B}{\gamma} + Z_B + h_{A-B}$$

Donde:

- $V$ : Velocidad (m/s)
- $g$ : Gravedad (m/s<sup>2</sup>)
- $P$ : Presión (kg/m<sup>2</sup>)
- $Z$ : Cota (m)
- $Pot$ : Potencia (HP)
- $\gamma$ : Peso específico (kg/m<sup>3</sup>)
- $Q$ : Caudal (m<sup>3</sup>/s)
- $h$ : Pérdida de carga (m)

Para la energía en el punto A, la velocidad y presión se desprecian y la altura en A es la cota 0m, entonces la expresión se reduce a:

$$\frac{Pot}{\gamma Q} = \frac{V_B^2}{2g} + \frac{P_B}{\gamma} + Z_B + h_{A-B}$$

- De la ecuación de continuidad, se obtiene la velocidad en  $V_B^2/2g$ . Teniendo en cuenta que se tiene un caudal a transportar de 0.367 l/s, (caudal requerido para simular la intensidad de precipitación correspondiente a un periodo de retorno de 10 años)

$$Q_B = V_B A_B$$

$$V_B = \frac{Q_B}{A_B} = \frac{0.367 \text{ l/s}}{\frac{\pi D_B^2}{4}} = \frac{0.000367 \text{ m}^3/\text{s}}{\frac{\pi (0.01905 \text{ m})^2}{4}} = 1.29 \text{ m/s}$$

$$\frac{V_B^2}{2g} = \frac{(1.29 \text{ m/s})^2}{2 \times 9.81 \text{ m/s}^2} = 0.08 \text{ m}$$

- De la cota del punto B, se obtiene  $Z_B$ :

$$Z_B = 7.32 \text{ m}$$

- Las pérdidas de cargas están representadas por perdidas de carga por fricción y perdidas de carga locales:

$$h_{A-B} = h_{fA-B} + h_{LA-B}$$

- Las pérdidas de carga por fricción vienen representadas por:

$$h_f = \frac{fLV^2}{D2g}$$

### En tramo de succión D=1"

$$Q = VA$$

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{0.367 \text{ l/s}}{\frac{\pi D^2}{4}} = \frac{0.000367 \text{ m}^3/\text{s}}{\frac{\pi (0.0254 \text{ m})^2}{4}} = 0.72 \text{ m/s}$$

Calculando el número de Reynolds

$$Re = \frac{VD}{\nu} = \frac{0.72 \text{ m/s} \times 0.0254 \text{ m}}{1.01 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}} = 18106$$

Al ser flujo turbulento y  $Re < 10^5$ , entonces  $f = 0.316/Re^{1/4}$ ; obteniéndose,  $f = 0.0272$

Reemplazando en la ecuación de pérdida de carga por fricción:

$$h_{fD=1''} = \frac{fLV^2}{D2g} = \frac{0.0272 \times 2.22m \times (0.72m/s)^2}{0.0254m \times 2 \times 9.81m/s^2} = 0.06m$$

**En tramo de succión D=3/4"**

$$Q = VA$$

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{0.367l/s}{\frac{\pi D^2}{4}} = \frac{0.000367m^3/s}{\frac{\pi(0.01905m)^2}{4}} = 1.29m/s$$

Calculando el número de Reynolds

$$Re = \frac{VD}{\nu} = \frac{1.29m/s \times 0.01905m}{1.01 \times 10^{-6}m^2/s} = 24331$$

Al ser flujo turbulento y  $Re < 10^5$ , entonces  $f = 0.316/Re^{1/4}$ ; obteniéndose,  $f = 0.0253$

Reemplazando en la ecuación de pérdida de carga por fricción:

Donde del esquema del sistema de aspersion:

$$L = 2.40 + 3.10 + 5.24 + 0.35 + 3.20 + 5.10 + 2.16 = 21.55$$

$$h_{fD=3/4''} = \frac{fLV^2}{D2g} = \frac{0.0253 \times 21.55m \times (1.29m/s)^2}{0.01905m \times 2 \times 9.81m/s^2} = 2.43m$$

Por lo tanto, la pérdida de carga por fricción es:

$$h_{fA-B} = h_{fD=1''} + h_{fD=3/4''}$$

$$h_{fA-B} = 0.06m + 2.43m = \mathbf{2.49m}$$

- Las pérdidas de carga locales vienen representadas por:

$$h_L = K_L \frac{V^2}{2g}$$

**En tramo de succión D=1"**

Se tiene 1 codo 90° roscado ( $K_L = 1.5$ ) y 1 válvula de filtro check ( $K_L = 2.5$ ).

$$h_{LD=1''} = K_L \frac{V^2}{2g} = (1.5 + 2.5) \times \frac{(0.72m/s)^2}{2 \times 9.81m/s^2} = 0.11m$$

**En tramo de succión D=3/4"**

Se tiene 7 codo 90° roscado ( $K_L = 1.5$ ), 1 tee roscado ( $K_L = 0.9$ ), 1 válvula de compuerta ( $K_L = 0.19$ ) y 2 reductores ( $K_L = 1$ ).

$$h_{LD=3/4"} = K_L \frac{V^2}{2g} = (7 \times 1.5 + 0.9 + 0.19 + 2 \times 1) \times \frac{(1.29m/s)^2}{2 \times 9.81m/s^2} = 1.15m$$

Por lo tanto, la pérdida de carga por fricción es:

$$h_{LA-B} = h_{LD=1"} + h_{LD=3/4"}$$

$$h_{LA-B} = 0.11m + 1.15m = \mathbf{1.26m}$$

También se puede considerar la pérdida local:

$$h_{LA-B} = 20\%(h_{fA-B} + Z_B - Z_A) = 20\%(2.49 + 7.32) = \mathbf{1.96m}$$

Del cual optamos por el valor más alto de pérdida local, teniendo así un valor final de pérdida de carga local:

$$h_{A-B} = h_{fA-B} + h_{LA-B}$$

$$h_{A-B} = 2.49m + 1.96m = 4.45m$$

**De los resultados reemplazando en la ecuación de energía, se obtiene:**

$$\frac{Pot}{\gamma Q} = \frac{V_B^2}{2g} + \frac{P_B}{\gamma} + Z_B + h_{A-B}$$

$$\frac{Pot}{\gamma Q} = 0.08m + \frac{P_B}{\gamma} + 7.32m + 4.45m$$

Para las boquillas de aspersión se requiere una presión mínima de 10 psi, equivalente a 7.04 metros de columna de agua. Entonces la Potencia de la bomba en HP requerida es:

$$\frac{Pot \times 76}{\gamma Q} = 0.08m + 7.04m + 7.32m + 4.45m = 18.89m$$

$$Pot = \frac{18.89 \times \gamma Q}{76} = \frac{18.89 \times 1 \times 0.367}{76} = 0.09HP$$

Por tanto, la potencia de la bomba requerida es de 0.09 HP.

Del cual, para una presión de 10 psi en las boquillas de aspersión, es necesario una potencia de bomba de 0.09 HP, con lo que una bomba de 1 HP es suficiente para el adecuado funcionamiento del sistema

## ANEXO G

## FACTORES DE CONVERSIÓN K PARA SENSORES DE FLUJO

$$K = \frac{n^{\circ} \text{Pulsos}}{\text{Volumen} \times 60}$$

## 1. Sensor de flujo D=3/4"

ITEM	TIEMPO (s)	N° PULSOS	VOLUMEN (L)	K
1	4.82	315	0.841	6.24
2	3.35	221	0.605	6.09
3	2.98	197	0.526	6.24
4	3.47	228	0.610	6.23
5	3.62	239	0.650	6.13
6	3.70	243	0.649	6.24
7	3.31	219	0.580	6.29
8	4.19	278	0.738	6.28
9	3.32	218	0.575	6.32
10	3.40	225	0.605	6.20
11	3.47	231	0.606	6.35
12	3.49	230	0.608	6.30
13	3.19	213	0.580	6.12
14	3.57	237	0.635	6.22
15	2.97	198	0.532	6.20
16	3.45	227	0.590	6.41
17	3.59	238	0.638	6.22
18	4.01	265	0.705	6.26
19	3.66	242	0.642	6.28
20	3.71	245	0.645	6.33
21	3.66	242	0.645	6.25
22	3.25	215	0.581	6.17
23	3.36	316	0.832	6.33
24	3.26	299	0.829	6.01
25	3.15	211	0.560	6.28
26	3.05	206	0.555	6.19
27	3.60	242	0.635	6.35
28	3.53	238	0.620	6.40
29	3.53	238	0.618	6.42
30	3.25	218	0.570	6.37
31	3.43	232	0.615	6.29
32	3.20	215	0.581	6.17
33	3.26	220	0.580	6.32
34	3.46	232	0.632	6.12
35	3.11	210	0.552	6.34
36	5.49	341	0.925	6.15
37	5.33	332	0.916	6.03
38	5.94	371	1.025	6.03
39	5.41	339	0.933	6.05
40	5.37	335	0.916	6.10
41	5.43	339	0.933	6.05
42	5.19	324	0.900	6.00
43	5.69	356	0.983	6.04
44	5.38	337	0.916	6.13
45	5.46	344	0.933	6.14
46	5.53	348	0.950	6.11
47	5.65	356	0.966	6.14
48	5.50	347	0.958	6.03
49	5.00	314	0.850	6.16
50	5.51	346	0.900	6.41
<b>Promedio</b>				<b>6.21</b>
<b>Desviación estándar</b>				<b>0.12</b>

2. Sensor de flujo D=1/2" (1)

ITEM	TIEMPO (s)	N° PULSOS	VOLUMEN (L)	K
1	3.25	108	0.282	6.38
2	3.74	122	0.335	6.07
3	3.30	107	0.271	6.58
4	3.35	109	0.259	7.01
5	3.49	114	0.292	6.51
6	3.46	113	0.285	6.61
7	3.49	114	0.281	6.76
8	3.76	122	0.310	6.56
9	3.19	103	0.270	6.36
10	3.56	117	0.277	7.04
11	3.34	170	0.429	6.60
12	3.65	187	0.490	6.36
13	3.39	128	0.319	6.69
14	3.44	131	0.319	6.84
15	4.63	176	0.450	6.52
16	4.26	162	0.395	6.84
17	4.47	170	0.422	6.71
18	4.65	176	0.419	7.00
19	4.59	174	0.431	6.73
20	3.61	213	0.510	6.96
21	3.48	174	0.410	7.07
22	3.91	194	0.471	6.86
23	3.77	188	0.455	6.89
24	3.67	181	0.425	7.10
25	3.73	186	0.463	6.70
26	3.56	178	0.415	7.15
27	3.31	164	0.411	6.65
28	3.21	160	0.384	6.94
29	3.44	172	0.388	7.39
30	3.54	173	0.420	6.87
31	3.28	160	0.389	6.86
32	3.42	170	0.409	6.93
33	3.39	168	0.406	6.90
34	3.76	187	0.479	6.51
35	3.02	150	0.385	6.49
36	3.45	169	0.419	6.72
37	3.13	156	0.410	6.34
38	3.09	152	0.379	6.68
39	2.80	138	0.340	6.76
40	3.73	183	0.460	6.63
41	3.58	176	0.440	6.67
42	3.24	159	0.405	6.54
43	3.42	169	0.406	6.94
44	3.24	160	0.370	7.21
45	3.49	170	0.432	6.56
46	3.52	172	0.425	6.75
47	3.61	178	0.445	6.67
48	3.38	167	0.392	7.10
49	3.57	175	0.420	6.94
50	3.33	164	0.385	7.10
<b>Promedio</b>				<b>6.76</b>
<b>Desviación estándar</b>				<b>0.26</b>

## 3. Sensor de flujo D=1/2" (2)

ITEM	TIEMPO (s)	N° PULSOS	VOLUMEN (L)	K
1	3.64	183	0.469	6.50
2	3.39	172	0.410	6.99
3	3.10	158	0.385	6.84
4	3.48	177	0.439	6.72
5	3.36	171	0.399	7.14
6	3.54	179	0.435	6.86
7	3.84	195	0.416	7.81
8	3.47	177	0.415	7.11
9	3.54	180	0.435	6.90
10	3.46	176	0.411	7.14
11	3.02	153	0.360	7.08
12	3.18	161	0.380	7.06
13	3.57	181	0.439	6.87
14	3.53	178	0.445	6.67
15	3.55	180	0.455	6.59
16	3.84	195	0.475	6.84
17	3.53	178	0.420	7.06
18	3.53	178	0.450	6.59
19	3.55	179	0.405	7.37
20	3.66	186	0.449	6.90
21	3.41	173	0.425	6.78
22	3.41	172	0.420	6.83
23	3.45	174	0.435	6.67
24	3.38	170	0.420	6.75
25	3.68	186	0.445	6.97
26	3.52	179	0.421	7.09
27	3.28	167	0.410	6.79
28	3.41	173	0.435	6.63
29	3.46	176	0.432	6.79
30	3.51	177	0.435	6.78
31	3.85	194	0.490	6.60
32	3.77	191	0.430	7.40
33	3.35	169	0.399	7.06
34	3.50	176	0.435	6.74
35	3.42	173	0.430	6.71
36	3.46	174	0.415	6.99
37	3.41	172	0.415	6.91
38	3.58	181	0.439	6.87
39	3.44	175	0.425	6.86
40	3.19	161	0.390	6.88
41	3.54	179	0.450	6.63
42	3.46	175	0.390	7.48
43	3.30	167	0.420	6.63
44	3.60	181	0.425	7.10
45	3.19	160	0.400	6.67
46	3.77	190	0.471	6.72
47	3.50	176	0.440	6.67
48	3.45	174	0.419	6.92
49	3.21	162	0.400	6.75
50	3.38	171	0.410	6.95
<b>Promedio</b>				<b>6.89</b>
<b>Desviación estándar</b>				<b>0.25</b>

## ANEXO H

### CÓDIGOS ARDUINO

#### 1. Código Arduino para calibración de los sensores de flujo

```
const int pin = 2;
volatile long pulses = 0;
long t = 0;

void isr(){
  pulses++;
}

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  while(!Serial.available())
    char c = Serial.read();
  t = millis();
  attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(pin), isr, RISING);
}

void loop(){
  Serial.print(millis() - t);
  Serial.print("\tPulsos: ");
  Serial.println(pulses);
  delay(10);
}
```

#### 2. Código Arduino para lectura de caudales de los sensores de flujo

```
template<class T> inline Print &operator <<(Print &obj, T arg) { obj.print(arg); return obj;}
#include "Caudalimetro.h"

const int Pres_Pin = 0;
const int N = 3;
Caudalimetro* Sensores[N];

void IRAM_ATTR isr0(){
  Sensores[0] -> Pulses++;
}

void IRAM_ATTR isr1(){
  Sensores[1] -> Pulses++;
}

void IRAM_ATTR isr2(){
  Sensores[2] -> Pulses++;
}

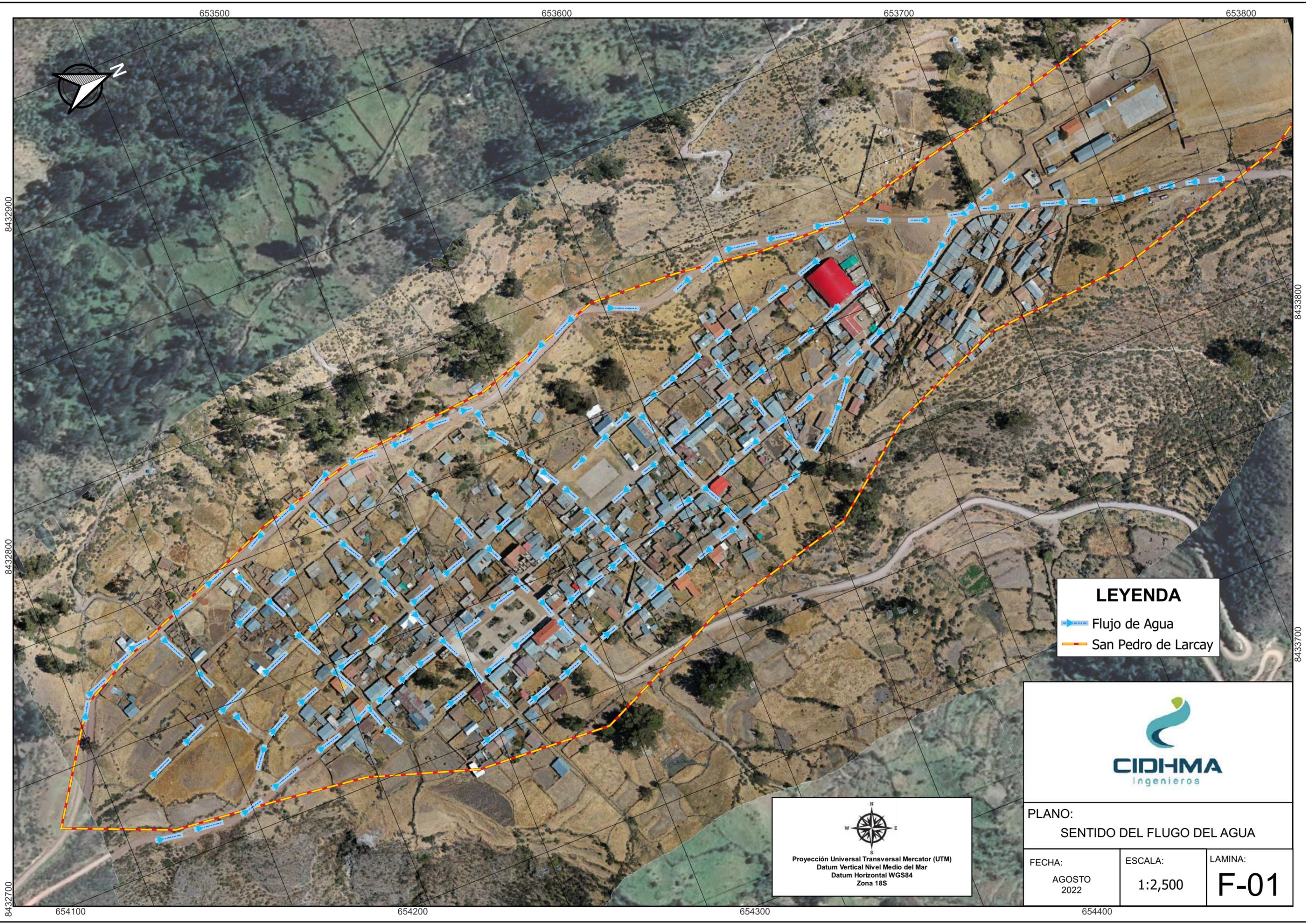
void setup() {
  Sensores[0] = new Caudalimetro(4); // Sensor de 3/4
  Sensores[1] = new Caudalimetro(5); // Sensor de 1/2 N° 1
  Sensores[2] = new Caudalimetro(18); // Sensor de 1/2 N° 2

  Sensores[0] -> begin(6.21);
  Sensores[1] -> begin(6.76);
  Sensores[2] -> begin(6.89);

  Sensores[0] -> setup(isr0);
  Sensores[1] -> setup(isr1);
  Sensores[2] -> setup(isr2);
  Serial.begin(57600);
}

void loop() {
  for(int i = 0 ; i < N; i++){
    Serial << "Caudalime N° " << i + 1 << ", " << Sensores[i] -> Caudal() << ', ' ;
  }
  Serial << '\n' ;
  delay(1000);
}
```

**ANEXO I**  
**MAPA DE SENTIDO DE FUJO DE AGUA**



8432900

8432800

8432700

8433800

8433700

653500

653600

653700

653800



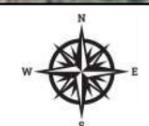
**LEYENDA**

-  Flujo de Agua
-  San Pedro de Larcay



PLANO:  
SENTIDO DEL FLUGO DEL AGUA

FECHA: AGOSTO 2022	ESCALA: 1:2,500	LAMINA: <b>F-01</b>
--------------------------	--------------------	------------------------



Proyección Universal Transversal Mercator (UTM)  
Datum Vertical Nivel Medio del Mar  
Datum Horizontal WGS84  
Zona 18S

654100

654200

654300

654400

**ANEXO J**  
**MAPA DE TECHOS CONVENCIONALES**

653800

653900

654000

654100

8433500

8433400

8433300

8433200

8433100

8433000

8433500

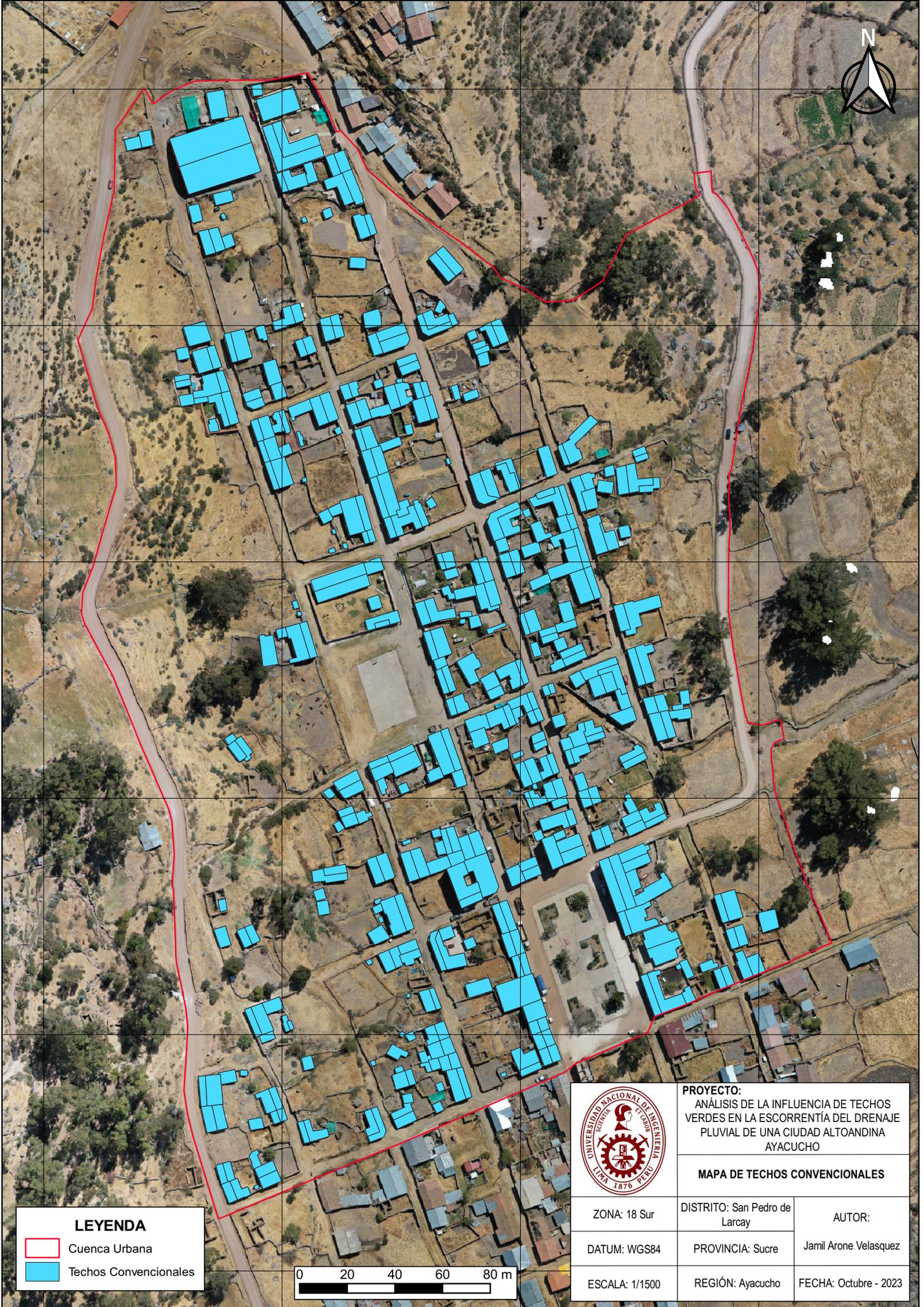
8433400

8433300

8433200

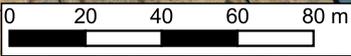
8433100

8433000



**LEYENDA**

- Cuenca Urbana
- Techos Convencionales



653800

653900

654000

654100



**PROYECTO:**  
ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DE TECHOS VERDES EN LA ESCORRENTÍA DEL DRENAJE PLUVIAL DE UNA CIUDAD ALTOANDINA AYACUCHO

**MAPA DE TECHOS CONVENCIONALES**

ZONA: 18 Sur	DISTRITO: San Pedro de Larcaj	AUTOR:
DATUM: WGS84	PROVINCIA: Sucre	Jamil Arone Velasquez
ESCALA: 1/1500	REGIÓN: Ayacucho	FECHA: Octubre - 2023

653800

653900

654000

654100

**ANEXO K**  
**MAPA DE TECHOS VERDES**

653800

653900

654000

654100

8433500

8433400

8433300

8433200

8433100

8433000

8433500

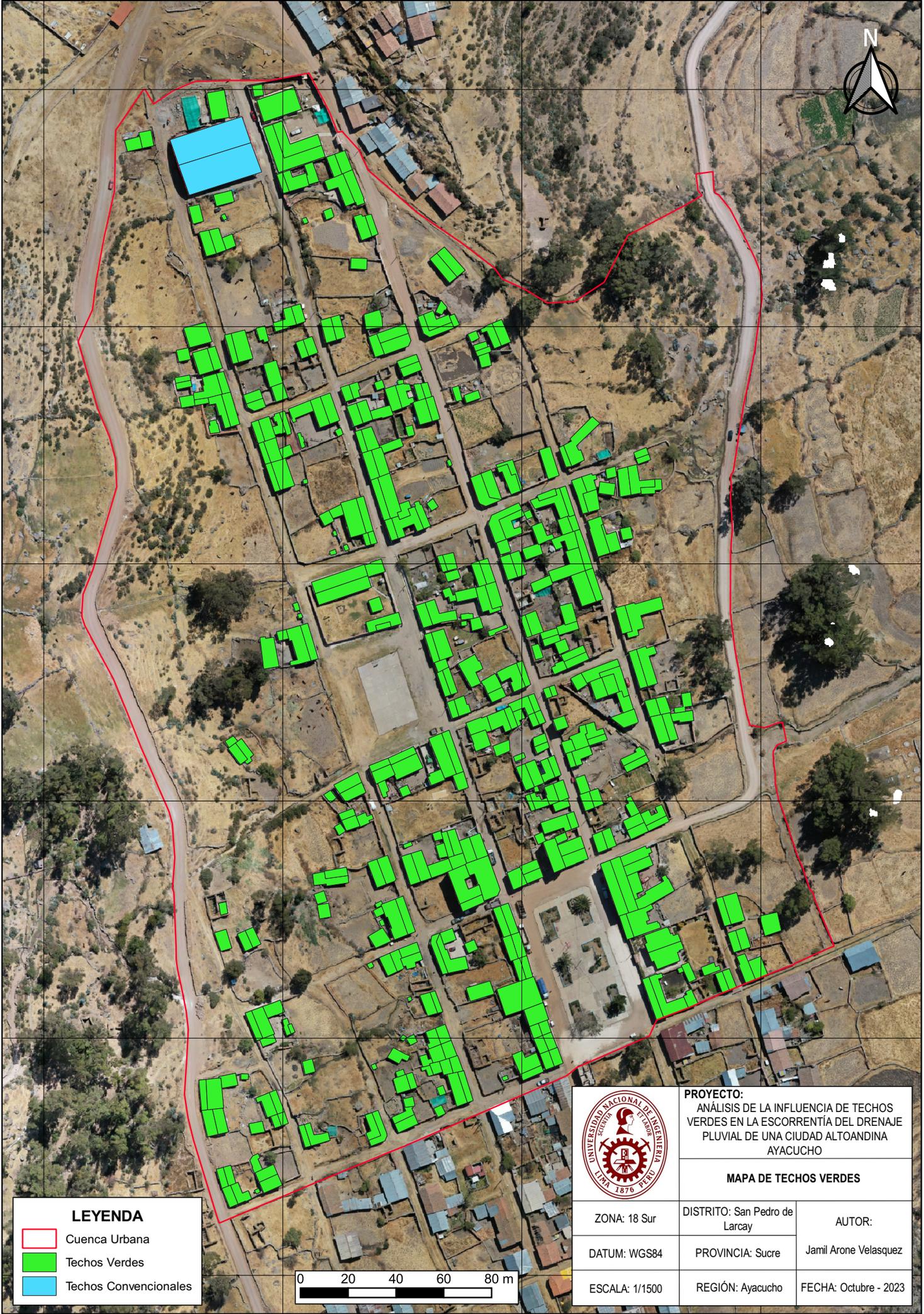
8433400

8433300

8433200

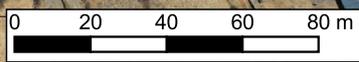
8433100

8433000



**LEYENDA**

- Cuenca Urbana
- Techos Verdes
- Techos Convencionales



**PROYECTO:**  
ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DE TECHOS VERDES EN LA ESCORRENTÍA DEL DRENAJE PLUVIAL DE UNA CIUDAD ALTOANDINA AYACUCHO

**MAPA DE TECHOS VERDES**

ZONA: 18 Sur	DISTRITO: San Pedro de Larcaý	AUTOR:
DATUM: WGS84	PROVINCIA: Sucre	Jamil Arone Velasquez
ESCALA: 1/1500	REGIÓN: Ayacucho	FECHA: Octubre - 2023

653800

653900

654000

654100

## ANEXO L

### MASAS DE GRÁNULO DE HARINA

1. Masa de gránulos de harina para Intensidad de 74.6 mm/h

MASAS (g)				
0.0118	0.0086	0.0042	0.0048	0.0052
0.0099	0.0096	0.0083	0.0054	0.0047
0.0097	0.0079	0.0059	0.0026	0.0046
0.0093	0.0095	0.0050	0.0054	0.0077
0.0101	0.0094	0.0041	0.0039	0.0043
0.0087	0.0076	0.0042	0.0044	0.0036
0.0088	0.0059	0.0068	0.0053	0.0044
0.0094	0.0067	0.0084	0.0048	0.0037
0.0096	0.0059	0.0071	0.0034	0.0042
0.0124	0.0061	0.0089	0.0045	0.0046

- Calculando el diámetro de los gránulos de harina mediante el método Luengas y De la Rosa (2015) se tiene:

DIÁMETROS (mm)				
2.91	2.62	2.05	2.15	2.20
2.74	2.72	2.58	2.23	2.13
2.73	2.54	2.30	1.74	2.11
2.69	2.71	2.18	2.23	2.52
2.76	2.70	2.03	2.00	2.07
2.63	2.51	2.05	2.08	1.95
2.64	2.30	2.42	2.22	2.08
2.70	2.40	2.60	2.15	1.96
2.72	2.30	2.45	1.91	2.05
2.96	2.33	2.65	2.10	2.11

$$D = 13.18 * m^{0.34}$$

$$D \text{ prom} = 2.36$$

- Calculando el diámetro de los gránulos de harina mediante el método Ngasoh et al. (2020) se tiene:

DIÁMETROS (mm)				
2.82	2.54	2.00	2.09	2.15
2.66	2.64	2.51	2.18	2.08
2.65	2.47	2.24	1.71	2.06
2.61	2.63	2.12	2.18	2.45
2.68	2.62	1.99	1.95	2.02
2.55	2.44	2.00	2.03	1.90
2.56	2.24	2.35	2.16	2.03
2.62	2.34	2.52	2.09	1.92
2.64	2.24	2.38	1.87	2.00
2.87	2.27	2.57	2.05	2.06

$$D_r = \sqrt[3]{\frac{6}{\pi} W}$$

$$D \text{ prom} = 2.30$$

2. Masa de gránulos de harina para Intensidad de 67.6 mm/h

MASAS (g)				
0.0059	0.0070	0.0060	0.0105	0.0074
0.0088	0.0079	0.0079	0.0130	0.0089
0.0086	0.0097	0.0085	0.0090	0.0075
0.0075	0.0083	0.0047	0.0087	0.0064
0.0063	0.0083	0.0086	0.0108	0.0080
0.0066	0.0080	0.0083	0.0113	0.0078
0.0083	0.0106	0.0093	0.0073	0.0083
0.0056	0.0090	0.0011	0.0084	0.0011
0.0074	0.0094	0.0073	0.0091	0.0059
0.0090	0.0095	0.0078	0.0074	0.0085

- Calculando el diámetro de los gránulos de harina mediante el método Luengas y De la Rosa (2015) se tiene:

DIÁMETROS (mm)				
2.30	2.44	2.31	2.80	2.49
2.64	2.54	2.54	3.01	2.65
2.62	2.73	2.61	2.66	2.50
2.50	2.58	2.13	2.63	2.37
2.35	2.58	2.62	2.83	2.55
2.39	2.55	2.58	2.87	2.53
2.58	2.81	2.69	2.47	2.58
2.26	2.66	1.28	2.60	1.31
2.49	2.70	2.47	2.67	2.30
2.66	2.71	2.53	2.49	2.61

$$D = 13.18 * m^{0.34}$$

**D prom = 2.51**

- Calculando el diámetro de los gránulos de harina mediante el método Ngasoh et al. (2020) se tiene:

DIÁMETROS (mm)				
2.24	2.37	2.25	2.72	2.42
2.56	2.47	2.47	2.92	2.57
2.54	2.65	2.53	2.58	2.43
2.43	2.51	2.08	2.55	2.30
2.29	2.51	2.54	2.74	2.48
2.33	2.48	2.51	2.78	2.46
2.51	2.73	2.61	2.41	2.51
2.20	2.58	1.26	2.52	1.29
2.42	2.62	2.41	2.59	2.24
2.58	2.63	2.46	2.42	2.53

$$D_r = \sqrt[3]{\frac{6}{\pi} W}$$

**D prom = 2.44**

3. Masa de gránulos de harina para Intensidad de 59.4 mm/h

MASAS (g)				
0.0072	0.0105	0.0070	0.0061	0.0080
0.0064	0.0060	0.0070	0.0066	0.0071
0.0085	0.0096	0.0062	0.0070	0.0077
0.0063	0.0120	0.0077	0.0066	0.0075
0.0077	0.0066	0.0060	0.0068	0.0100
0.0061	0.0138	0.0063	0.0103	0.0078
0.0060	0.0090	0.0061	0.0065	0.0082
0.0074	0.0079	0.0072	0.0078	0.0076
0.0110	0.0135	0.0092	0.0067	0.0107
0.0077	0.0082	0.0064	0.0073	0.0062

- Calculando el diámetro de los gránulos de harina mediante el método Luengas y De la Rosa (2015) se tiene:

DIÁMETROS (mm)				
2.46	2.80	2.44	2.33	2.55
2.37	2.31	2.44	2.39	2.45
2.61	2.72	2.34	2.44	2.52
2.35	2.93	2.52	2.39	2.50
2.52	2.39	2.31	2.42	2.75
2.33	3.07	2.35	2.78	2.53
2.31	2.66	2.33	2.38	2.57
2.49	2.54	2.46	2.53	2.51
2.84	3.05	2.68	2.40	2.82
2.52	2.57	2.37	2.47	2.34

$$D = 13.18 * m^{0.34}$$

$$D \text{ prom} = 2.52$$

- Calculando el diámetro de los gránulos de harina mediante el método Ngasoh et al. (2020) se tiene:

DIÁMETROS (mm)				
2.40	2.72	2.37	2.27	2.48
2.30	2.25	2.37	2.33	2.38
2.53	2.64	2.28	2.37	2.45
2.29	2.84	2.45	2.33	2.43
2.45	2.33	2.25	2.35	2.67
2.27	2.98	2.29	2.70	2.46
2.25	2.58	2.27	2.32	2.50
2.42	2.47	2.40	2.46	2.44
2.76	2.95	2.60	2.34	2.73
2.45	2.50	2.30	2.41	2.28

$$D_r = \sqrt[3]{\frac{6}{\pi} W}$$

$$D \text{ prom} = 2.45$$

**ANEXO M**

**MAPAS DE INUNDACIÓN PARA LOS 18 ESCENARIOS DEL  
MODELAMIENTO EN HEC-RAS 2D**

653800

653900

654000

654100

8433500

8433400

8433300

8433200

8433100

8433000

8433500

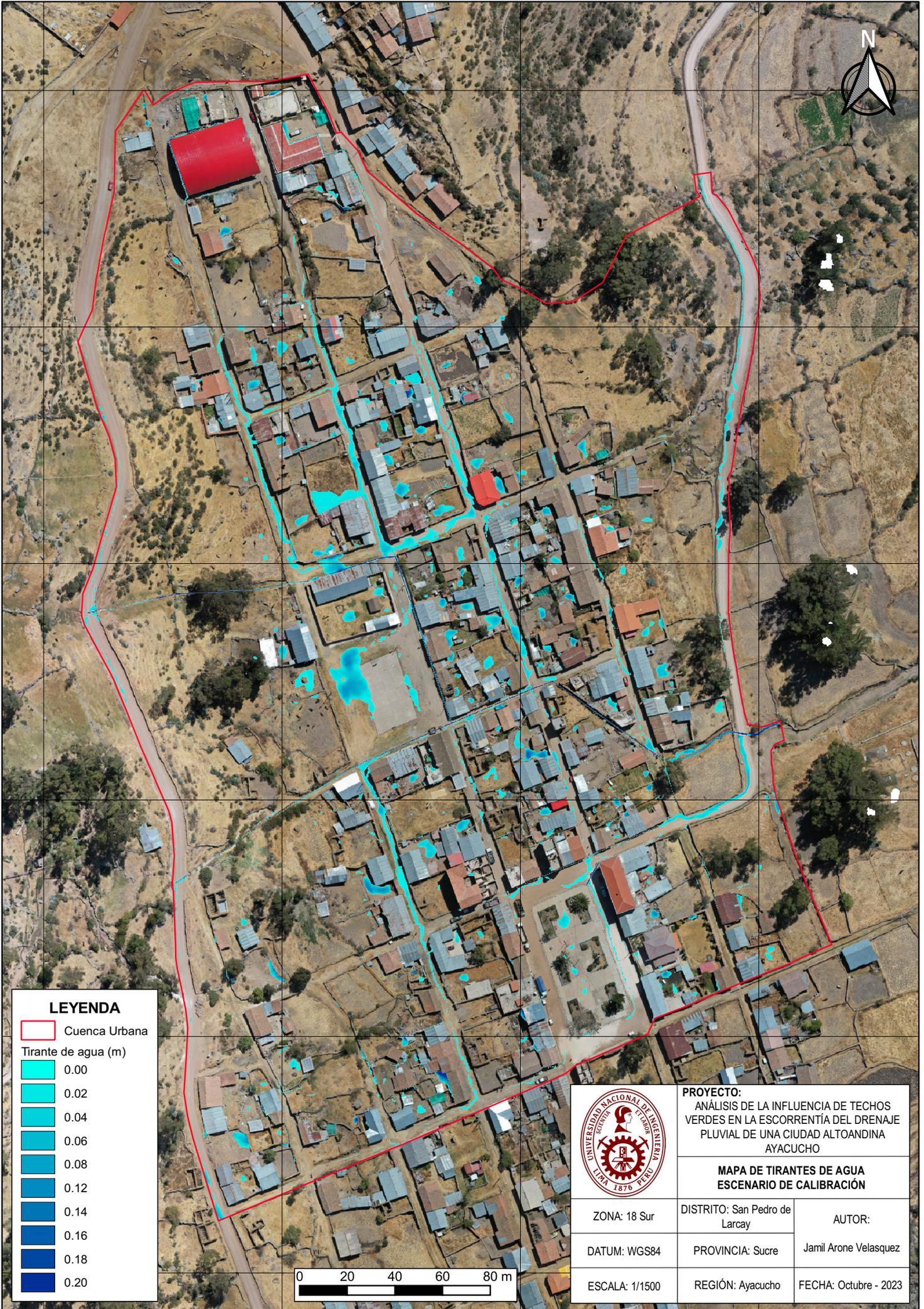
8433400

8433300

8433200

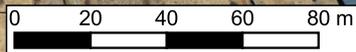
8433100

8433000



**LEYENDA**

- Cuenca Urbana
- Tirante de agua (m)
- 0.00
- 0.02
- 0.04
- 0.06
- 0.08
- 0.12
- 0.14
- 0.16
- 0.18
- 0.20



**PROYECTO:**  
 ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DE TECHOS VERDES EN LA ESCORRIENTÍA DEL DRENAJE PLUVIAL DE UNA CIUDAD ALTOANDINA AYACUCHO

**MAPA DE TIRANTES DE AGUA  
 ESCENARIO DE CALIBRACIÓN**

ZONA: 18 Sur	DISTRITO: San Pedro de Larcay	AUTOR:
DATUM: WGS84	PROVINCIA: Sucre	Jamil Arone Velasquez
ESCALA: 1/1500	REGIÓN: Ayacucho	FECHA: Octubre - 2023

653800

653900

654000

654100

653800

653900

654000

654100

8433500

8433400

8433300

8433200

8433100

8433000

8433500

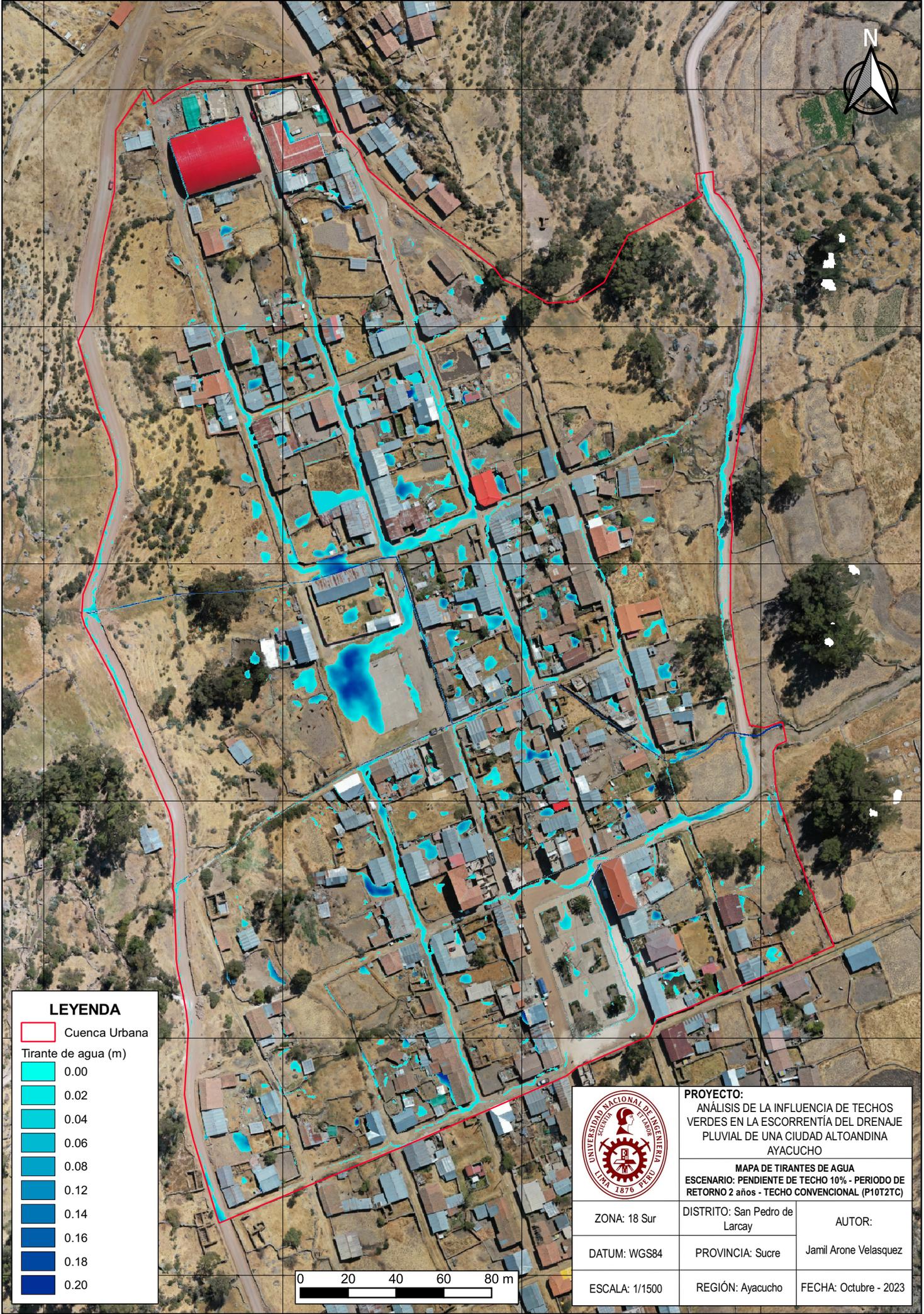
8433400

8433300

8433200

8433100

8433000

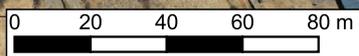


**LEYENDA**

 Cuenca Urbana

Tirante de agua (m)

-  0.00
-  0.02
-  0.04
-  0.06
-  0.08
-  0.12
-  0.14
-  0.16
-  0.18
-  0.20



**PROYECTO:**  
ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DE TECHOS VERDES EN LA ESCORRENTÍA DEL DRENAJE PLUVIAL DE UNA CIUDAD ALTOANDINA AYACUCHO

**MAPA DE TIRANTES DE AGUA**  
ESCENARIO: PENDIENTE DE TECHO 10% - PERIODO DE RETORNO 2 años - TECHO CONVENCIONAL (P10T2TC)

ZONA: 18 Sur	DISTRITO: San Pedro de Larcaay	AUTOR:
DATUM: WGS84	PROVINCIA: Sucre	Jamil Arone Velasquez
ESCALA: 1/1500	REGIÓN: Ayacucho	FECHA: Octubre - 2023

653800

653900

654000

654100

653800

653900

654000

654100

8433500

8433400

8433300

8433200

8433100

8433000

8433500

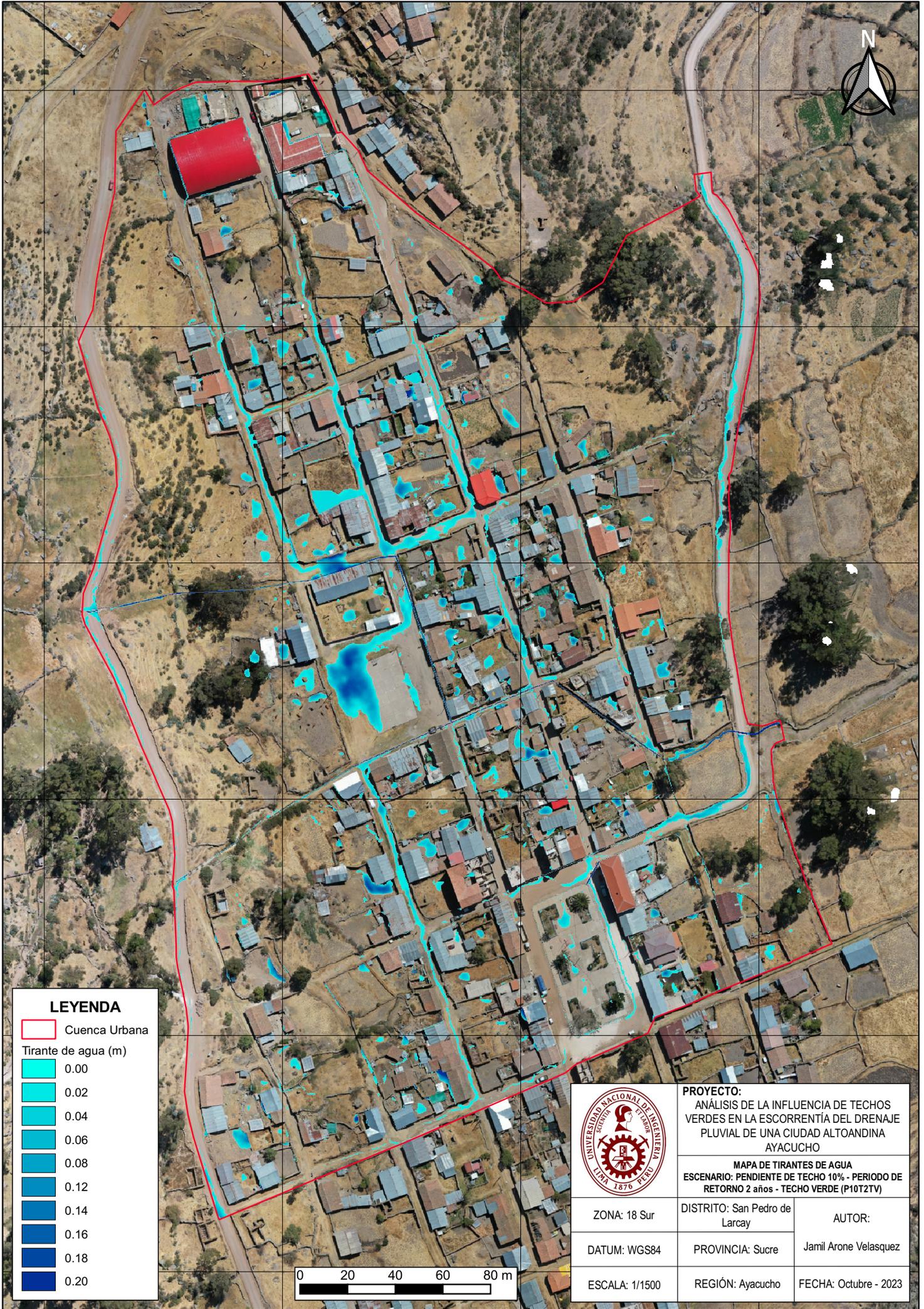
8433400

8433300

8433200

8433100

8433000



**LEYENDA**

- Cuenca Urbana
- Tirante de agua (m)
- 0.00
- 0.02
- 0.04
- 0.06
- 0.08
- 0.12
- 0.14
- 0.16
- 0.18
- 0.20



**PROYECTO:**  
ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DE TECHOS VERDES EN LA ESCORRENTÍA DEL DRENAJE PLUVIAL DE UNA CIUDAD ALTOANDINA AYACUCHO

**MAPA DE TIRANTES DE AGUA**  
ESCENARIO: PENDIENTE DE TECHO 10% - PERIODO DE RETORNO 2 años - TECHO VERDE (P10T2TV)

ZONA: 18 Sur	DISTRITO: San Pedro de Larcaay	AUTOR:
DATUM: WGS84	PROVINCIA: Sucre	Jamil Arone Velasquez
ESCALA: 1/1500	REGIÓN: Ayacucho	FECHA: Octubre - 2023

653800

653900

654000

654100

653800

653900

654000

654100

8433500

8433500

8433400

8433400

8433300

8433300

8433200

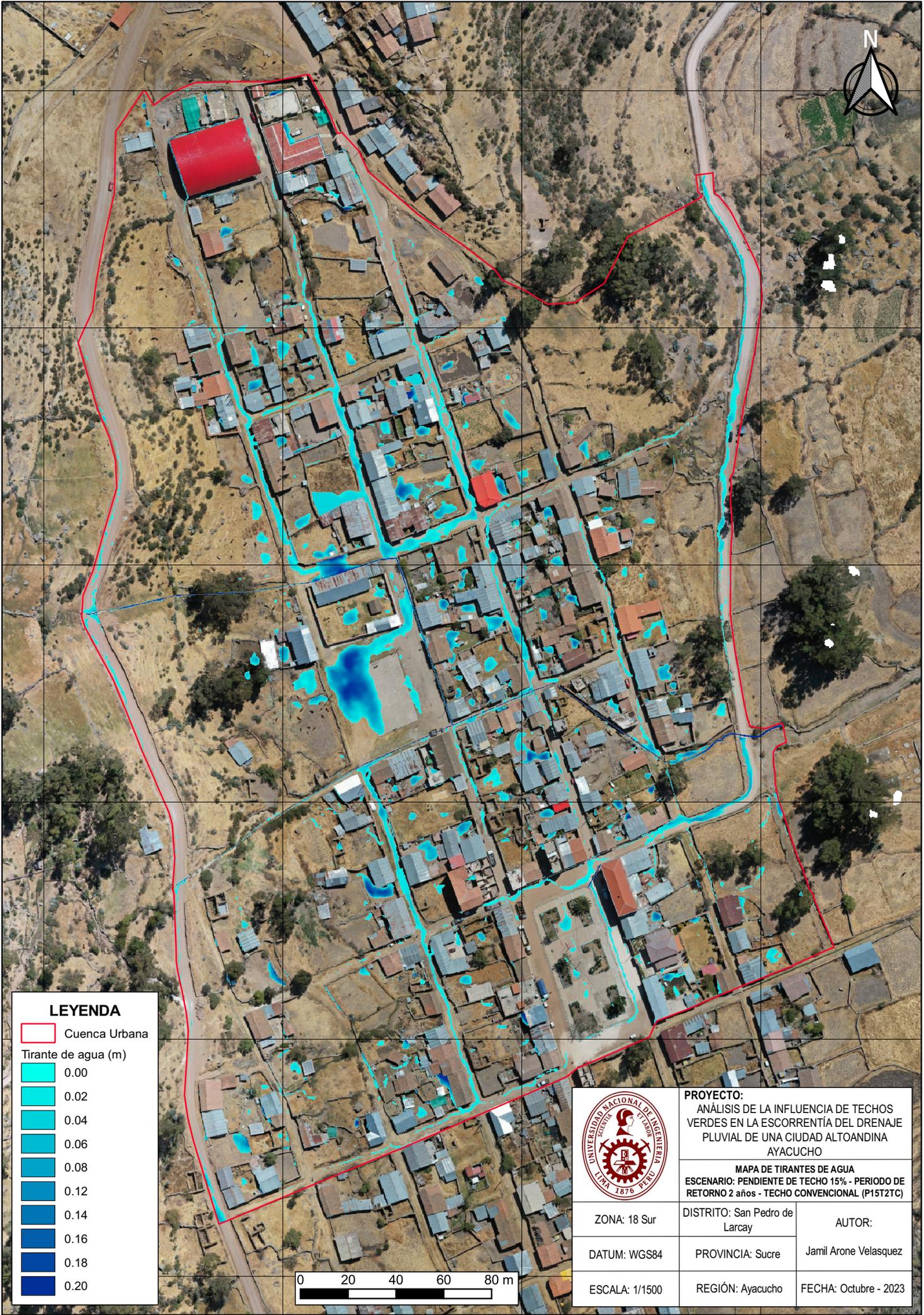
8433200

8433100

8433100

8433000

8433000

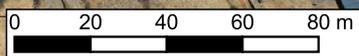


**LEYENDA**

 Cuenca Urbana

Tirante de agua (m)

-  0.00
-  0.02
-  0.04
-  0.06
-  0.08
-  0.12
-  0.14
-  0.16
-  0.18
-  0.20



**PROYECTO:**  
ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DE TECHOS VERDES EN LA ESCORRENTÍA DEL DRENAJE PLUVIAL DE UNA CIUDAD ALTOANDINA AYACUCHO

**MAPA DE TIRANTES DE AGUA**  
ESCENARIO: PENDIENTE DE TECHO 15% - PERIODO DE RETORNO 2 años - TECHO CONVENCIONAL (P15T2TC)

ZONA: 18 Sur	DISTRITO: San Pedro de Larcaay	AUTOR:
DATUM: WGS84	PROVINCIA: Sucre	Jamil Arone Velasquez
ESCALA: 1/1500	REGIÓN: Ayacucho	FECHA: Octubre - 2023

653800

653900

654000

654100

653800

653900

654000

654100

8433500

8433400

8433300

8433200

8433100

8433000

8433500

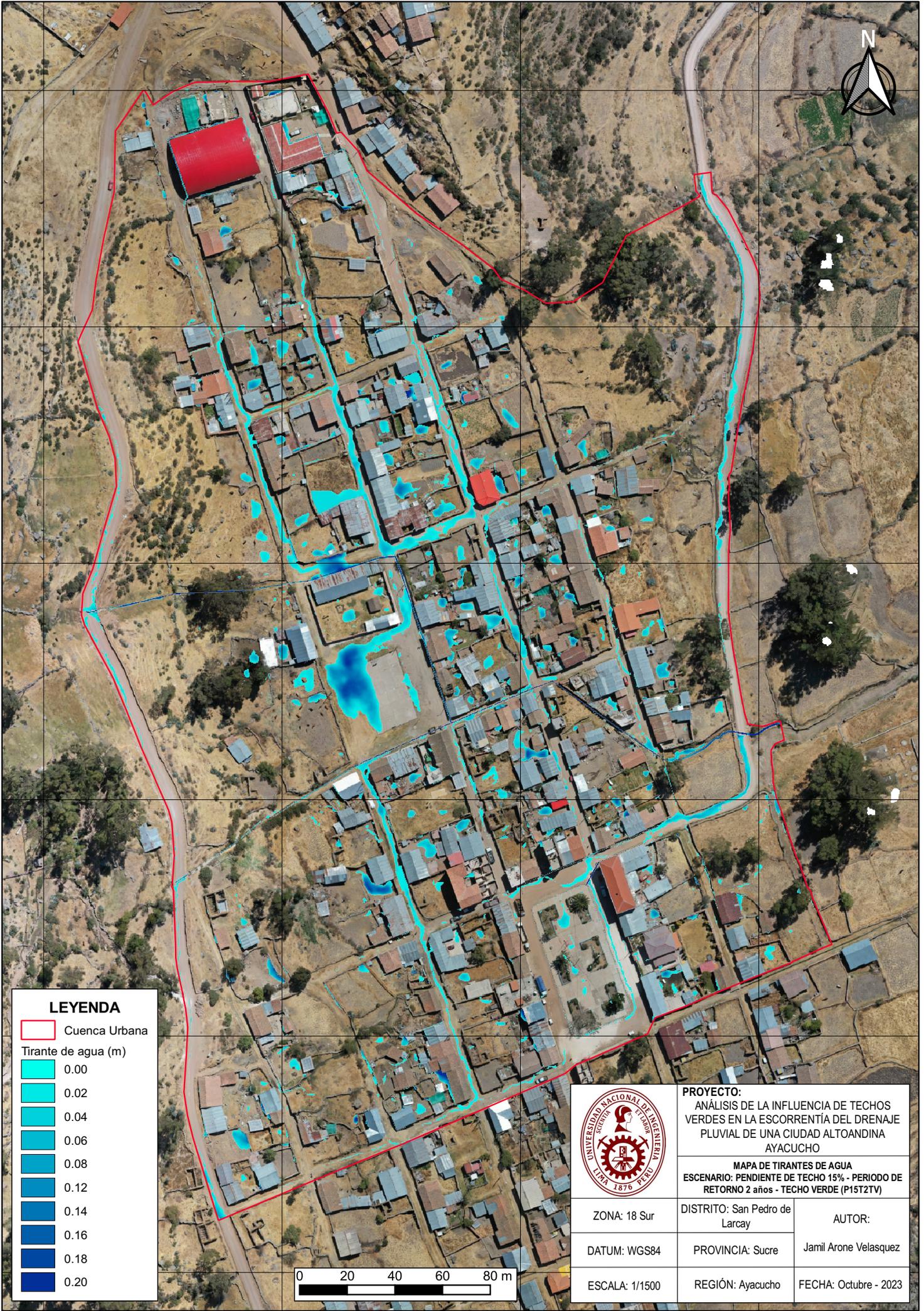
8433400

8433300

8433200

8433100

8433000

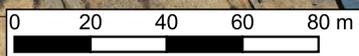


**LEYENDA**

 Cuenca Urbana

Tirante de agua (m)

-  0.00
-  0.02
-  0.04
-  0.06
-  0.08
-  0.12
-  0.14
-  0.16
-  0.18
-  0.20



**PROYECTO:**  
ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DE TECHOS VERDES EN LA ESCORRENTÍA DEL DRENAJE PLUVIAL DE UNA CIUDAD ALTOANDINA AYACUCHO

**MAPA DE TIRANTES DE AGUA**  
ESCENARIO: PENDIENTE DE TECHO 15% - PERIODO DE RETORNO 2 años - TECHO VERDE (P15T2TV)

ZONA: 18 Sur	DISTRITO: San Pedro de Larcaay	AUTOR:
DATUM: WGS84	PROVINCIA: Sucre	Jamil Arone Velasquez
ESCALA: 1/1500	REGIÓN: Ayacucho	FECHA: Octubre - 2023

653800

653900

654000

654100

653800

653900

654000

654100

8433500

8433400

8433300

8433200

8433100

8433000

8433500

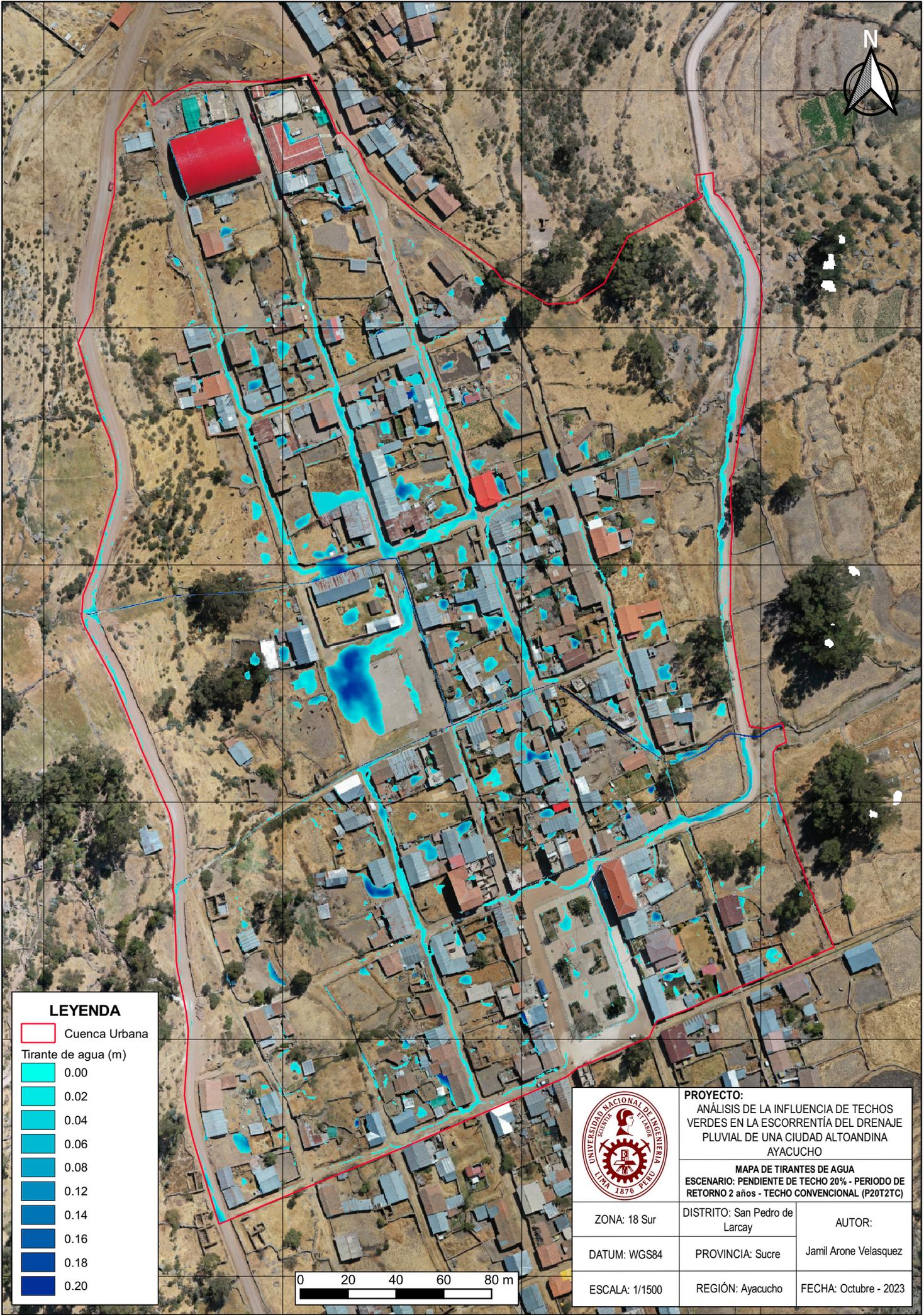
8433400

8433300

8433200

8433100

8433000

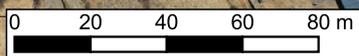


**LEYENDA**

 Cuenca Urbana

Tirante de agua (m)

-  0.00
-  0.02
-  0.04
-  0.06
-  0.08
-  0.12
-  0.14
-  0.16
-  0.18
-  0.20



**PROYECTO:**  
ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DE TECHOS VERDES EN LA ESCORRENTÍA DEL DRENAJE PLUVIAL DE UNA CIUDAD ALTOANDINA AYACUCHO

**MAPA DE TIRANTES DE AGUA**  
ESCENARIO: PENDIENTE DE TECHO 20% - PERIODO DE RETORNO 2 años - TECHO CONVENCIONAL (P20T2TC)

ZONA: 18 Sur	DISTRITO: San Pedro de Larcaay	AUTOR:
DATUM: WGS84	PROVINCIA: Sucre	Jamil Arone Velasquez
ESCALA: 1/1500	REGIÓN: Ayacucho	FECHA: Octubre - 2023

653800

653900

654000

654100

653800

653900

654000

654100

8433500

8433400

8433300

8433200

8433100

8433000

8433500

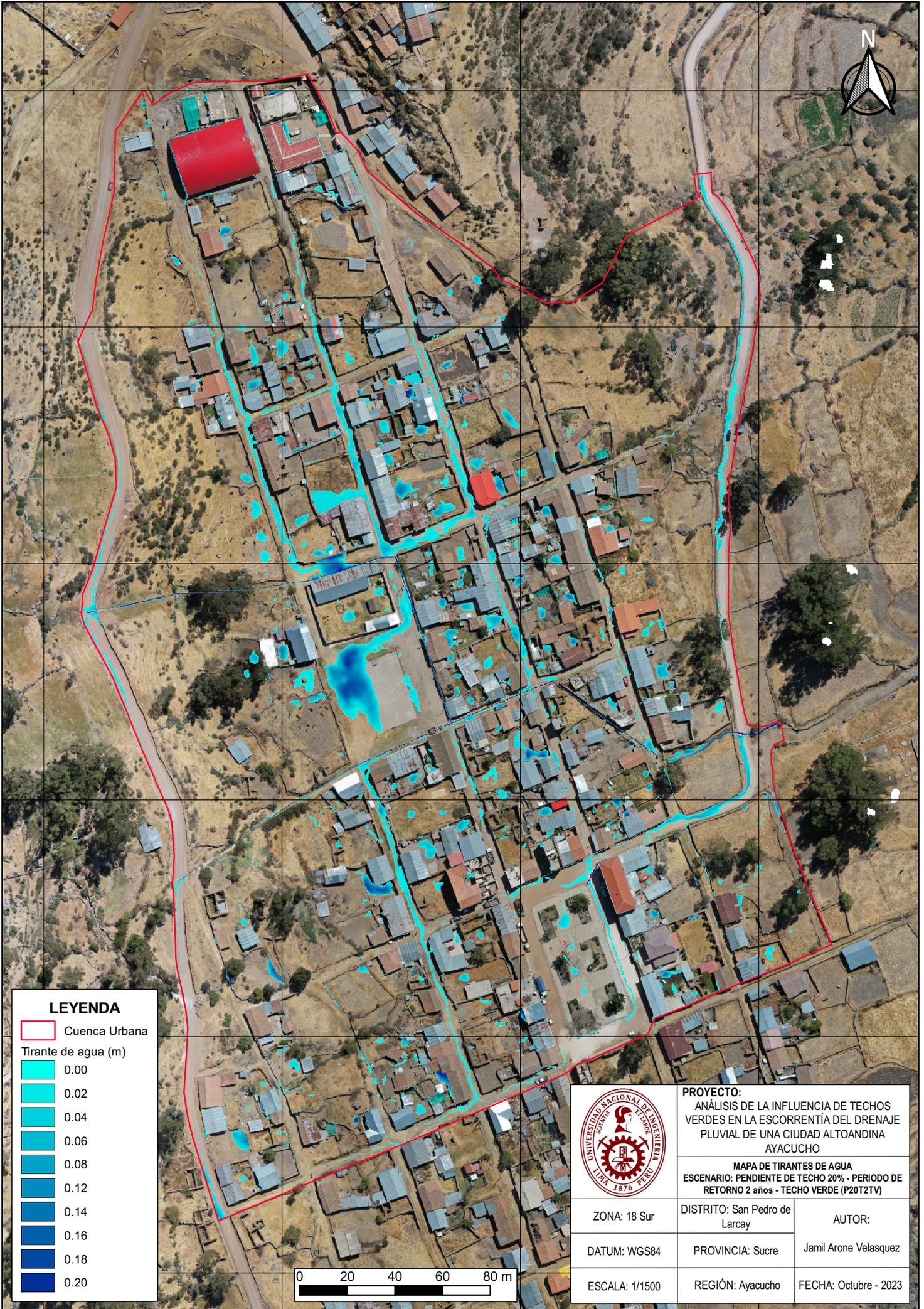
8433400

8433300

8433200

8433100

8433000

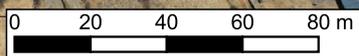


**LEYENDA**

 Cuenca Urbana

Tirante de agua (m)

-  0.00
-  0.02
-  0.04
-  0.06
-  0.08
-  0.12
-  0.14
-  0.16
-  0.18
-  0.20



**PROYECTO:**  
ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DE TECHOS VERDES EN LA ESCORRENTÍA DEL DRENAJE PLUVIAL DE UNA CIUDAD ALTOANDINA AYACUCHO

**MAPA DE TIRANTES DE AGUA**  
ESCENARIO: PENDIENTE DE TECHO 20% - PERIODO DE RETORNO 2 años - TECHO VERDE (P20T2TV)

ZONA: 18 Sur	DISTRITO: San Pedro de Larcaay	AUTOR:
DATUM: WGS84	PROVINCIA: Sucre	Jamil Arone Velasquez
ESCALA: 1/1500	REGIÓN: Ayacucho	FECHA: Octubre - 2023

653800

653900

654000

654100

653800

653900

654000

654100

8433500

8433500

8433400

8433400

8433300

8433300

8433200

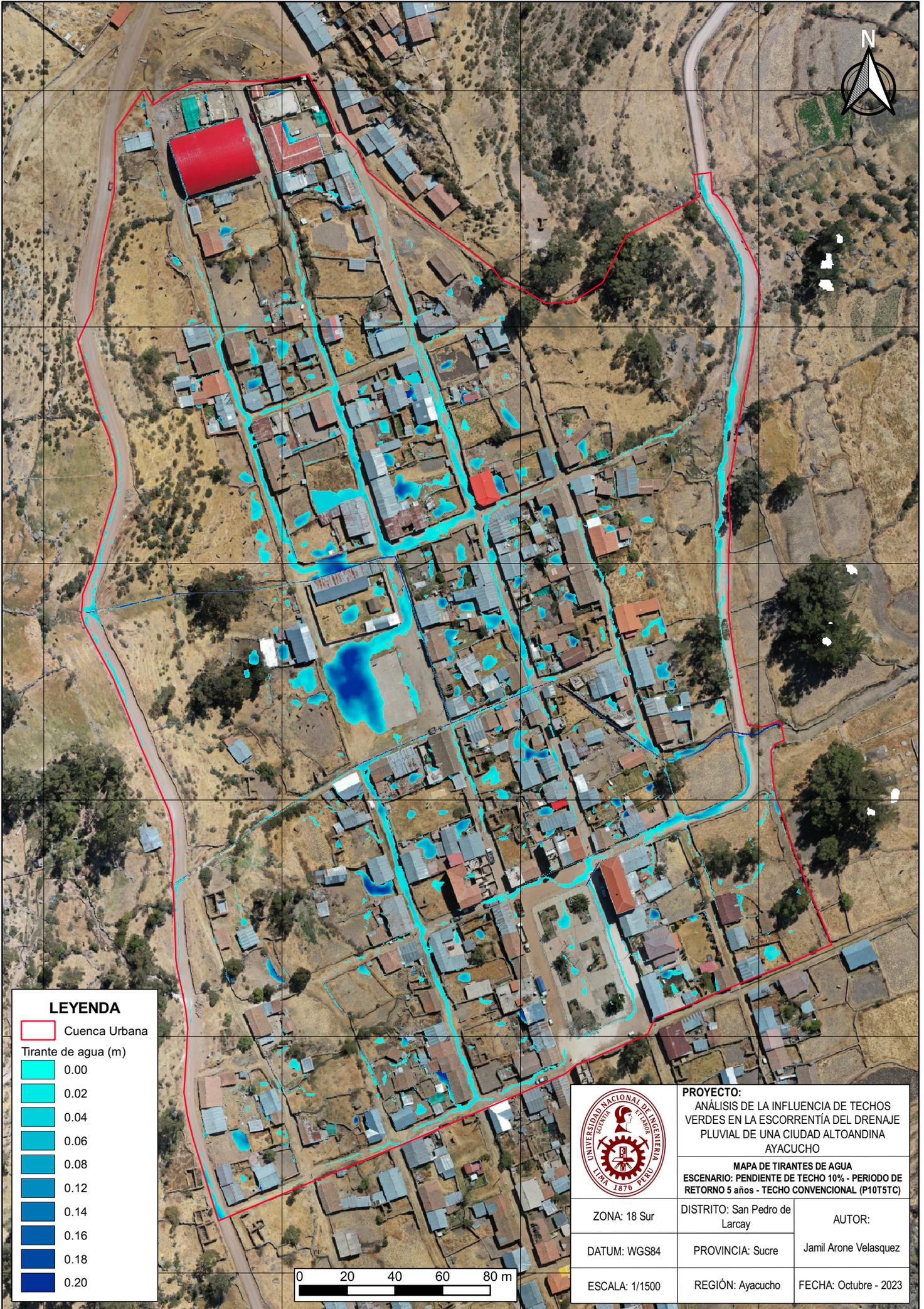
8433200

8433100

8433100

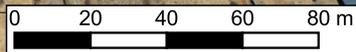
8433000

8433000



**LEYENDA**

- Cuenca Urbana
- Tirante de agua (m)
- 0.00
- 0.02
- 0.04
- 0.06
- 0.08
- 0.12
- 0.14
- 0.16
- 0.18
- 0.20



**PROYECTO:**  
ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DE TECHOS VERDES EN LA ESCORRENTÍA DEL DRENAJE PLUVIAL DE UNA CIUDAD ALTOANDINA AYACUCHO

**MAPA DE TIRANTES DE AGUA**  
ESCENARIO: PENDIENTE DE TECHO 10% - PERIODO DE RETORNO 5 años - TECHO CONVENCIONAL (P10T5TC)

ZONA: 18 Sur	DISTRITO: San Pedro de Larcay	AUTOR:
DATUM: WGS84	PROVINCIA: Sucre	Jamil Arone Velasquez
ESCALA: 1/1500	REGIÓN: Ayacucho	FECHA: Octubre - 2023

653800

653900

654000

654100

653800

653900

654000

654100

8433500

8433400

8433300

8433200

8433100

8433000

8433500

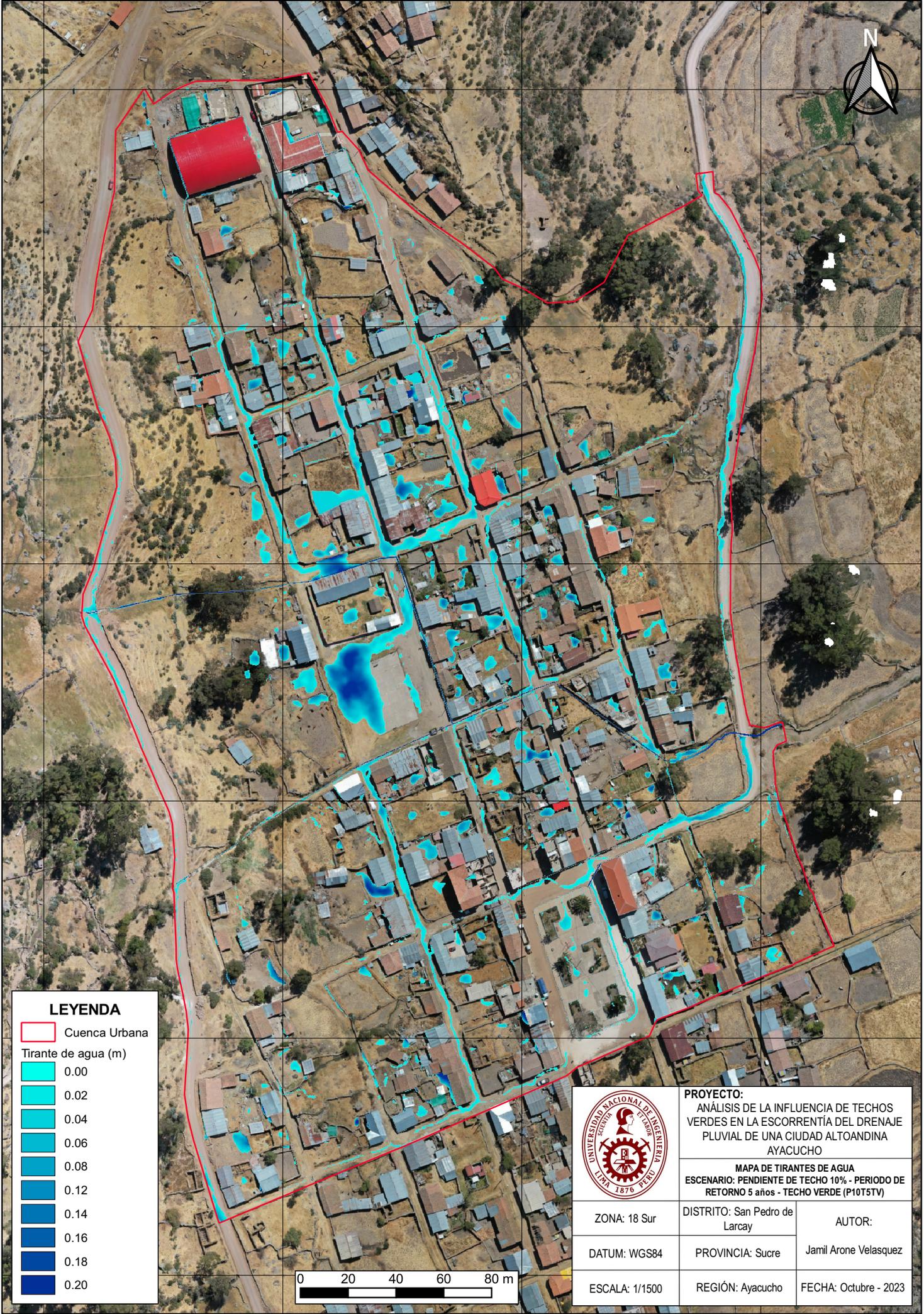
8433400

8433300

8433200

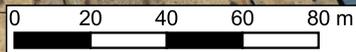
8433100

8433000



**LEYENDA**

-  Cuenca Urbana
- Tirante de agua (m)
-  0.00
-  0.02
-  0.04
-  0.06
-  0.08
-  0.12
-  0.14
-  0.16
-  0.18
-  0.20



**PROYECTO:**  
ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DE TECHOS VERDES EN LA ESCORRENTÍA DEL DRENAJE PLUVIAL DE UNA CIUDAD ALTOANDINA AYACUCHO

**MAPA DE TIRANTES DE AGUA**  
ESCENARIO: PENDIENTE DE TECHO 10% - PERIODO DE RETORNO 5 años - TECHO VERDE (P10T5TV)

ZONA: 18 Sur	DISTRITO: San Pedro de Larcaay	AUTOR:
DATUM: WGS84	PROVINCIA: Sucre	Jamil Arone Velasquez
ESCALA: 1/1500	REGIÓN: Ayacucho	FECHA: Octubre - 2023

653800

653900

654000

654100

653800

653900

654000

654100

8433500

8433500

8433400

8433400

8433300

8433300

8433200

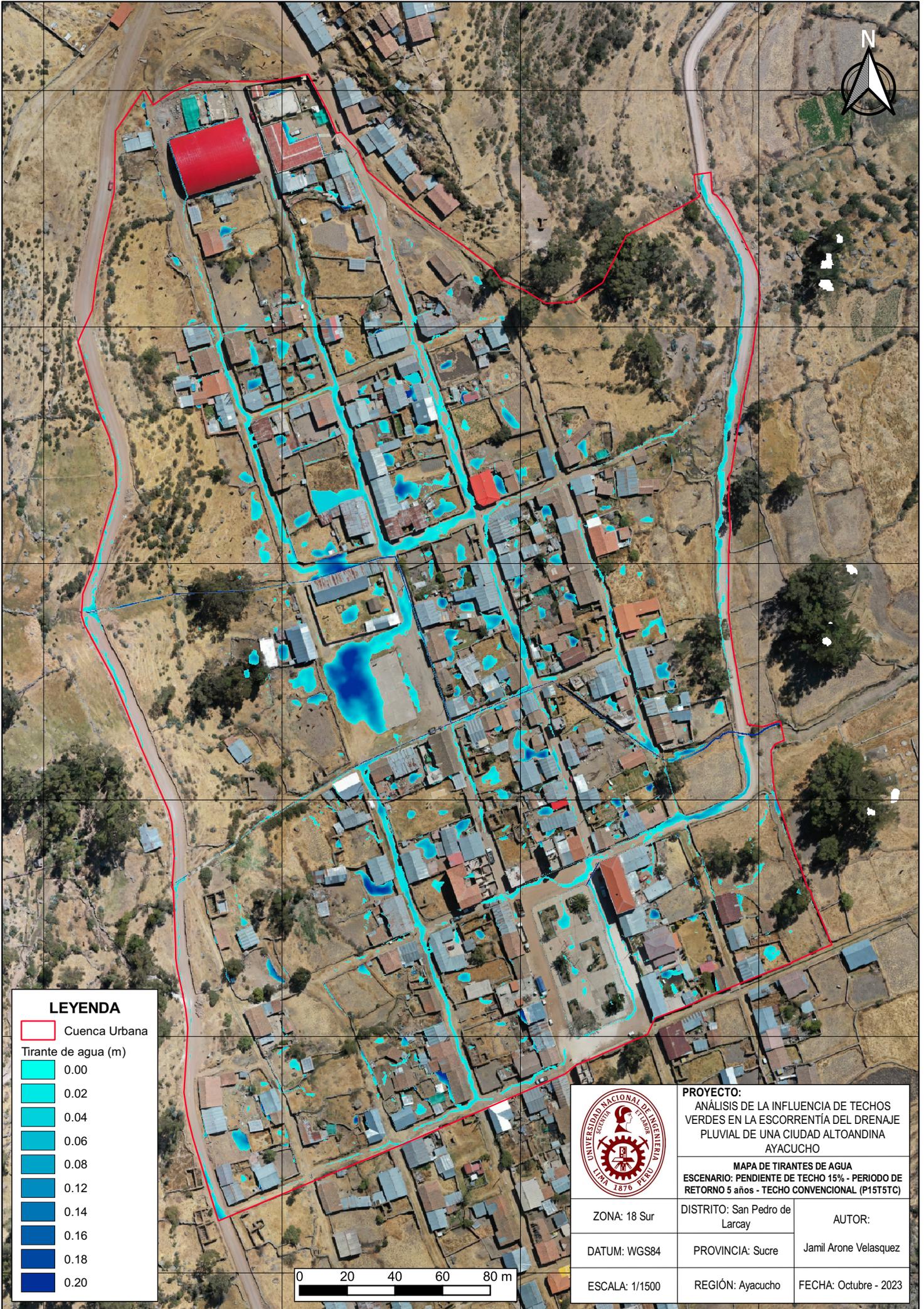
8433200

8433100

8433100

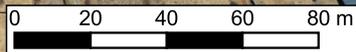
8433000

8433000



**LEYENDA**

- Cuenca Urbana
- Tirante de agua (m)
- 0.00
- 0.02
- 0.04
- 0.06
- 0.08
- 0.12
- 0.14
- 0.16
- 0.18
- 0.20



**PROYECTO:**  
 ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DE TECHOS VERDES EN LA ESCORRENTÍA DEL DRENAJE PLUVIAL DE UNA CIUDAD ALTOANDINA AYACUCHO

**MAPA DE TIRANTES DE AGUA**  
 ESCENARIO: PENDIENTE DE TECHO 15% - PERIODO DE RETORNO 5 años - TECHO CONVENCIONAL (P15T5C)

ZONA: 18 Sur	DISTRITO: San Pedro de Larcaay	AUTOR:
DATUM: WGS84	PROVINCIA: Sucre	Jamil Arone Velasquez
ESCALA: 1/1500	REGIÓN: Ayacucho	FECHA: Octubre - 2023

653800

653900

654000

654100

653800

653900

654000

654100

8433500

8433500

8433400

8433400

8433300

8433300

8433200

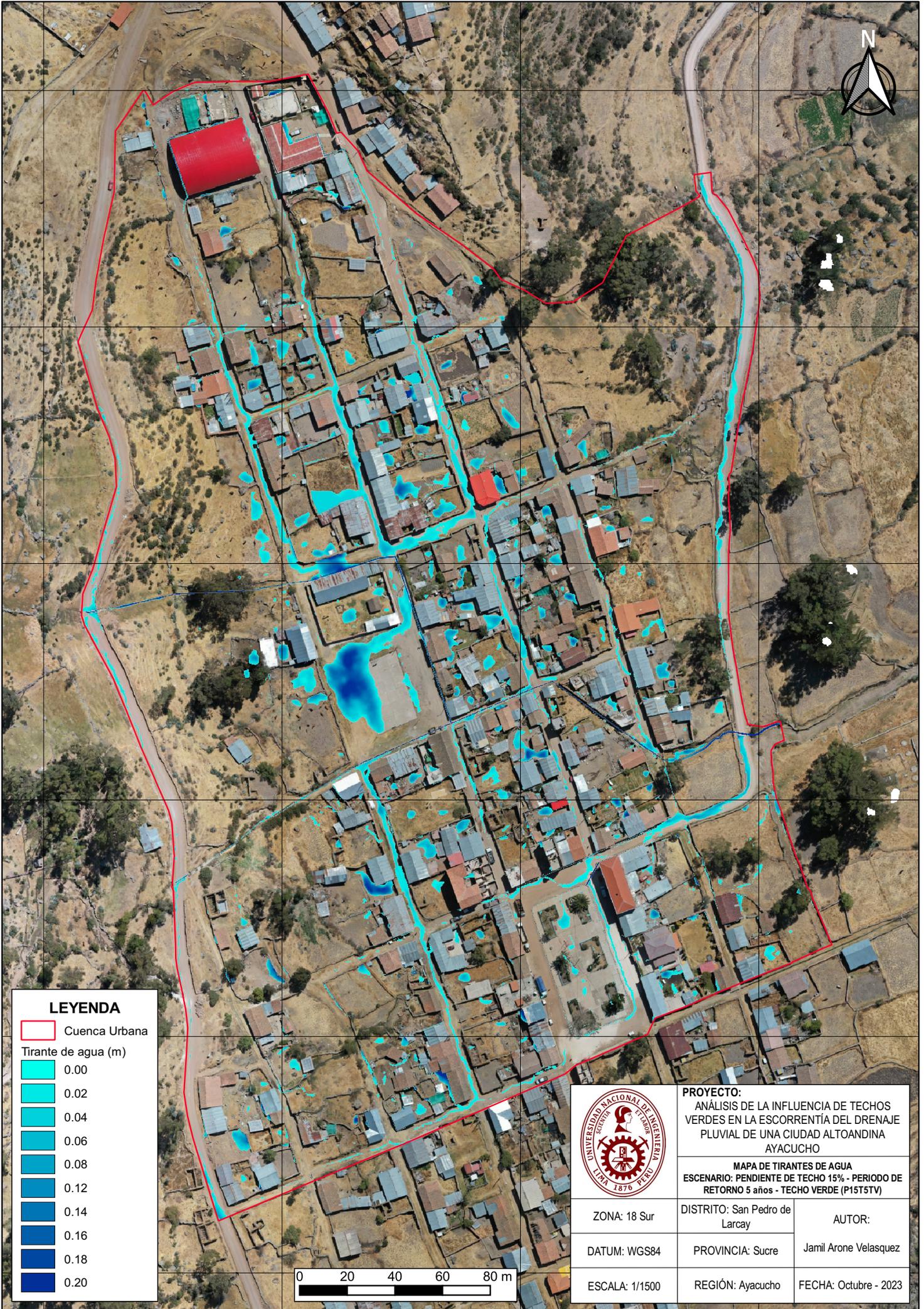
8433200

8433100

8433100

8433000

8433000

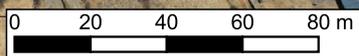


**LEYENDA**

 Cuenca Urbana

Tirante de agua (m)

-  0.00
-  0.02
-  0.04
-  0.06
-  0.08
-  0.12
-  0.14
-  0.16
-  0.18
-  0.20



**PROYECTO:**  
ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DE TECHOS VERDES EN LA ESCORRENTÍA DEL DRENAJE PLUVIAL DE UNA CIUDAD ALTOANDINA AYACUCHO

**MAPA DE TIRANTES DE AGUA**  
ESCENARIO: PENDIENTE DE TECHO 15% - PERIODO DE RETORNO 5 años - TECHO VERDE (P15T5TV)

ZONA: 18 Sur	DISTRITO: San Pedro de Larcay	AUTOR:
DATUM: WGS84	PROVINCIA: Sucre	Jamil Arone Velasquez
ESCALA: 1/1500	REGIÓN: Ayacucho	FECHA: Octubre - 2023

653800

653900

654000

654100

653800

653900

654000

654100

8433500

8433400

8433300

8433200

8433100

8433000

8433500

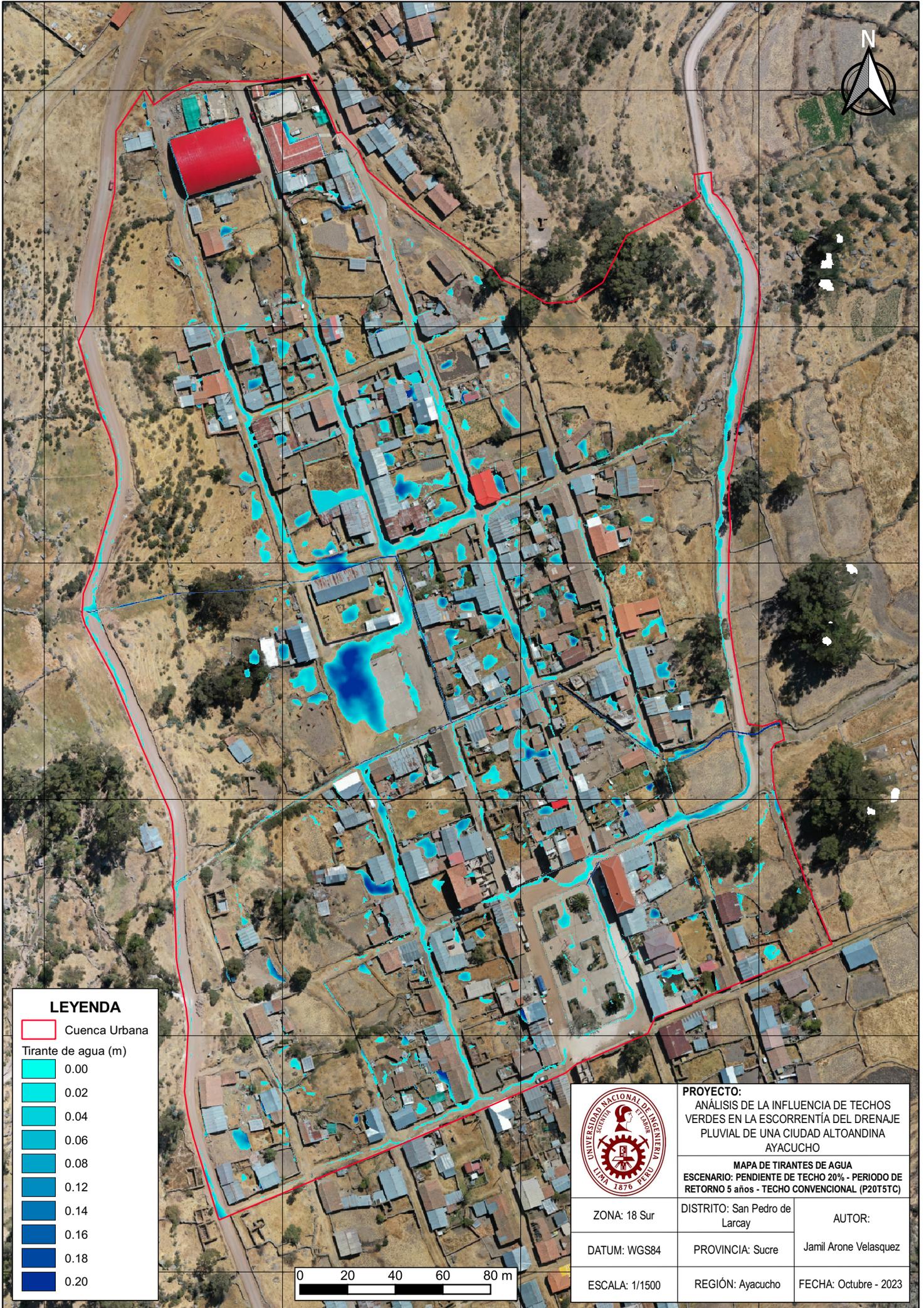
8433400

8433300

8433200

8433100

8433000



**LEYENDA**

- Cuenca Urbana
- Tirante de agua (m)
- 0.00
- 0.02
- 0.04
- 0.06
- 0.08
- 0.12
- 0.14
- 0.16
- 0.18
- 0.20



**PROYECTO:**  
ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DE TECHOS VERDES EN LA ESCORRENTÍA DEL DRENAJE PLUVIAL DE UNA CIUDAD ALTOANDINA AYACUCHO

**MAPA DE TIRANTES DE AGUA**  
ESCENARIO: PENDIENTE DE TECHO 20% - PERIODO DE RETORNO 5 años - TECHO CONVENCIONAL (P20T5TC)

ZONA: 18 Sur	DISTRITO: San Pedro de Larcaay	AUTOR:
DATUM: WGS84	PROVINCIA: Sucre	Jamil Arone Velasquez
ESCALA: 1/1500	REGIÓN: Ayacucho	FECHA: Octubre - 2023

653800

653900

654000

654100

653800

653900

654000

654100

8433500

8433400

8433300

8433200

8433100

8433000

8433500

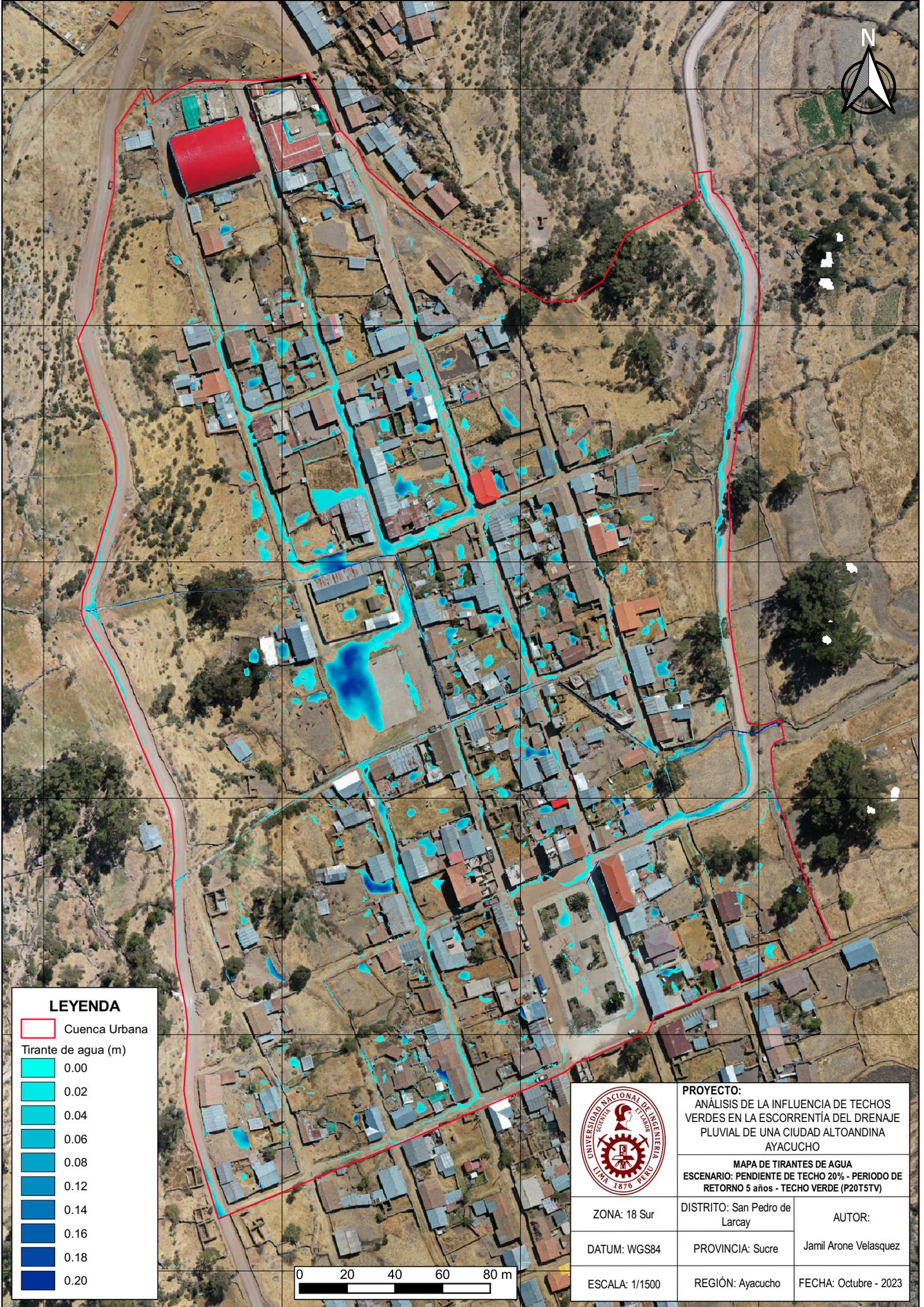
8433400

8433300

8433200

8433100

8433000

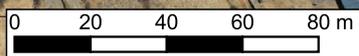


**LEYENDA**

 Cuenca Urbana

Tirante de agua (m)

-  0.00
-  0.02
-  0.04
-  0.06
-  0.08
-  0.12
-  0.14
-  0.16
-  0.18
-  0.20



**PROYECTO:**  
ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DE TECHOS VERDES EN LA ESCORRENTÍA DEL DRENAJE PLUVIAL DE UNA CIUDAD ALTOANDINA AYACUCHO

**MAPA DE TIRANTES DE AGUA**  
ESCENARIO: PENDIENTE DE TECHO 20% - PERIODO DE RETORNO 5 años - TECHO VERDE (P20T5TV)

ZONA: 18 Sur	DISTRITO: San Pedro de Larcay	AUTOR:
DATUM: WGS84	PROVINCIA: Sucre	Jamil Arone Velasquez
ESCALA: 1/1500	REGIÓN: Ayacucho	FECHA: Octubre - 2023

653800

653900

654000

654100

653800

653900

654000

654100

8433500

8433500

8433400

8433400

8433300

8433300

8433200

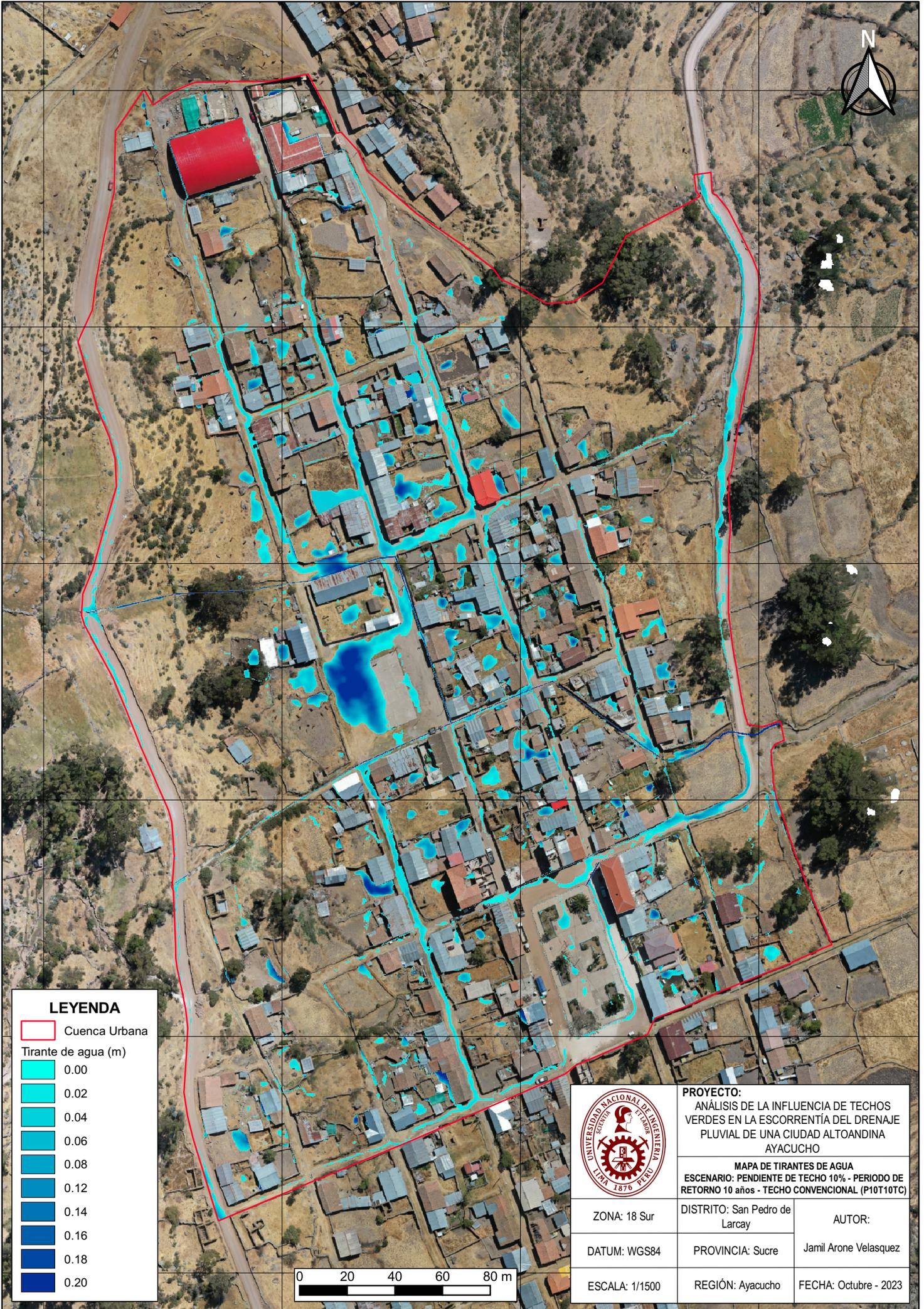
8433200

8433100

8433100

8433000

8433000



**LEYENDA**

- Cuenca Urbana
- Tirante de agua (m)
- 0.00
- 0.02
- 0.04
- 0.06
- 0.08
- 0.12
- 0.14
- 0.16
- 0.18
- 0.20



**PROYECTO:**  
ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DE TECHOS VERDES EN LA ESCORRENTÍA DEL DRENAJE PLUVIAL DE UNA CIUDAD ALTOANDINA AYACUCHO

**MAPA DE TIRANTES DE AGUA**  
ESCENARIO: PENDIENTE DE TECHO 10% - PERIODO DE RETORNO 10 años - TECHO CONVENCIONAL (P10T10TC)

ZONA: 18 Sur	DISTRITO: San Pedro de Larcaay	AUTOR:
DATUM: WGS84	PROVINCIA: Sucre	Jamil Arone Velasquez
ESCALA: 1/1500	REGIÓN: Ayacucho	FECHA: Octubre - 2023

653800

653900

654000

654100

653800

653900

654000

654100

8433500

8433400

8433300

8433200

8433100

8433000

8433500

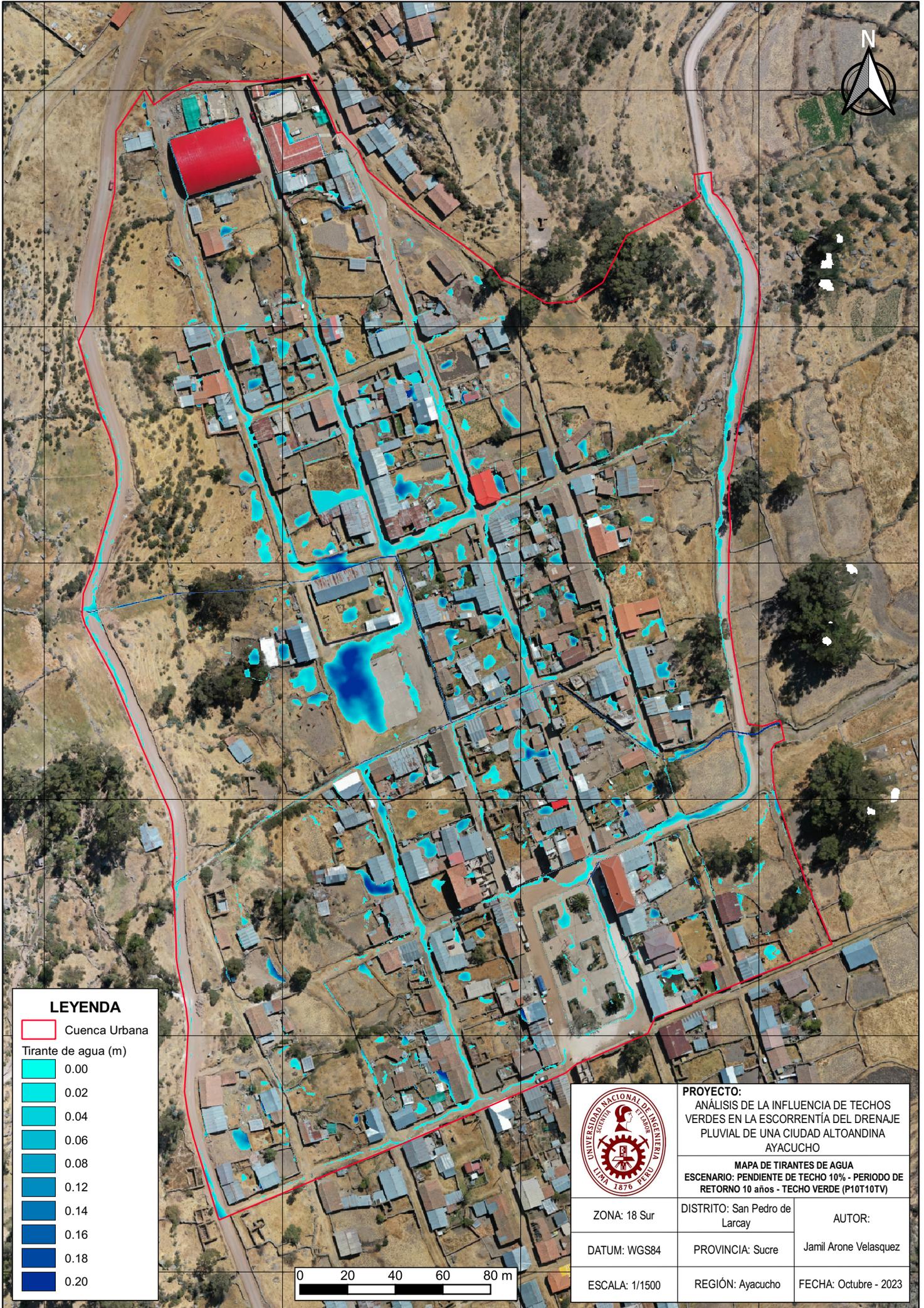
8433400

8433300

8433200

8433100

8433000

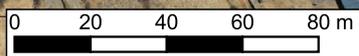


**LEYENDA**

 Cuenca Urbana

Tirante de agua (m)

-  0.00
-  0.02
-  0.04
-  0.06
-  0.08
-  0.12
-  0.14
-  0.16
-  0.18
-  0.20



**PROYECTO:**  
ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DE TECHOS VERDES EN LA ESCORRENTÍA DEL DRENAJE PLUVIAL DE UNA CIUDAD ALTOANDINA AYACUCHO

**MAPA DE TIRANTES DE AGUA**  
ESCENARIO: PENDIENTE DE TECHO 10% - PERIODO DE RETORNO 10 años - TECHO VERDE (P10T10TV)

ZONA: 18 Sur	DISTRITO: San Pedro de Larcay	AUTOR:
DATUM: WGS84	PROVINCIA: Sucre	Jamil Arone Velasquez
ESCALA: 1/1500	REGIÓN: Ayacucho	FECHA: Octubre - 2023

653800

653900

654000

654100

653800

653900

654000

654100

8433500

8433400

8433300

8433200

8433100

8433000

8433500

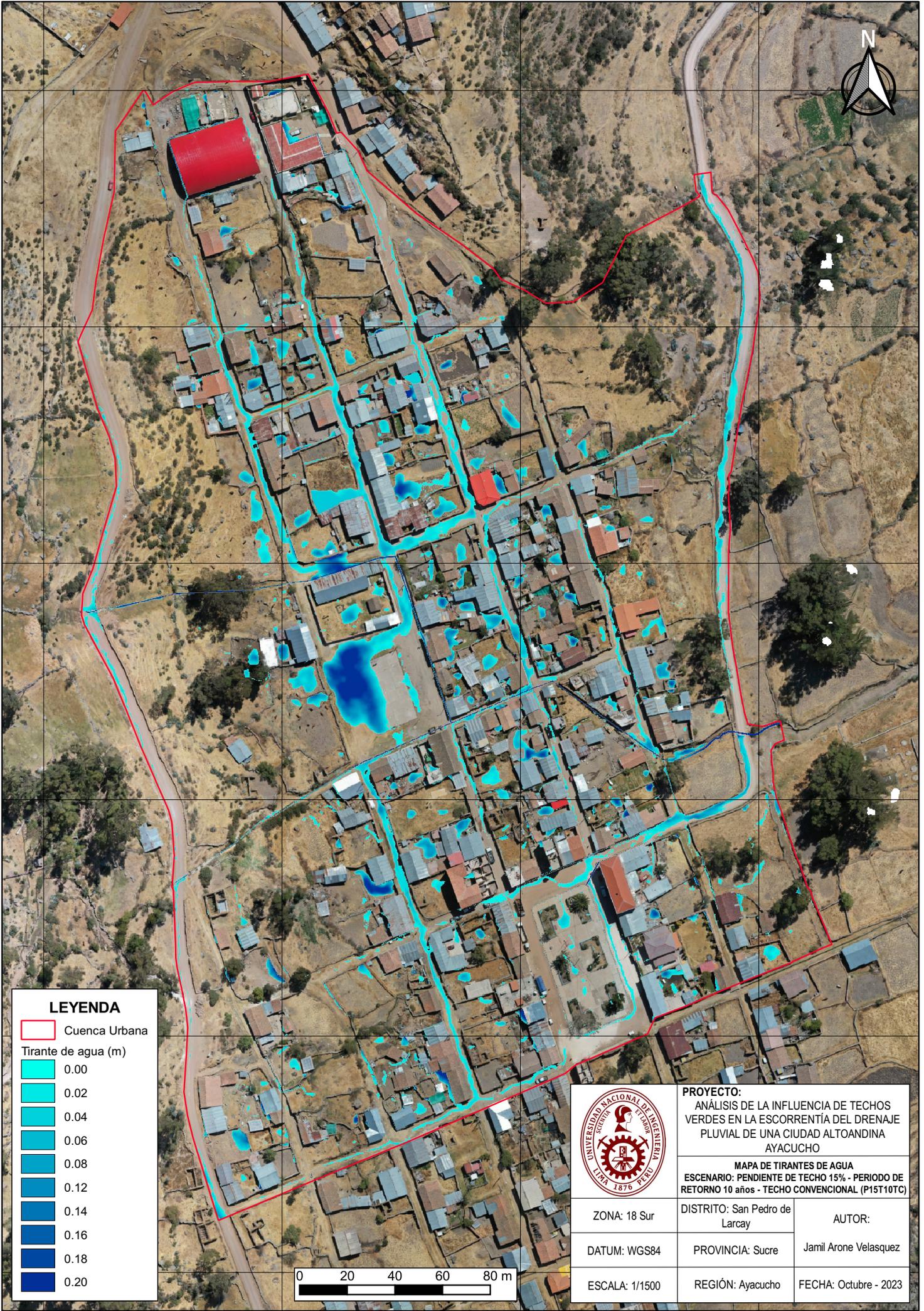
8433400

8433300

8433200

8433100

8433000

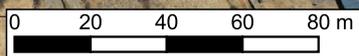


**LEYENDA**

 Cuenca Urbana

Tirante de agua (m)

-  0.00
-  0.02
-  0.04
-  0.06
-  0.08
-  0.12
-  0.14
-  0.16
-  0.18
-  0.20



**PROYECTO:**  
ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DE TECHOS VERDES EN LA ESCORRENTÍA DEL DRENAJE PLUVIAL DE UNA CIUDAD ALTOANDINA AYACUCHO

**MAPA DE TIRANTES DE AGUA**  
ESCENARIO: PENDIENTE DE TECHO 15% - PERIODO DE RETORNO 10 años - TECHO CONVENCIONAL (P15T10TC)

ZONA: 18 Sur	DISTRITO: San Pedro de Larcaay	AUTOR:
DATUM: WGS84	PROVINCIA: Sucre	Jamil Arone Velasquez
ESCALA: 1/1500	REGIÓN: Ayacucho	FECHA: Octubre - 2023

653800

653900

654000

654100

653800

653900

654000

654100

8433500

8433500

8433400

8433400

8433300

8433300

8433200

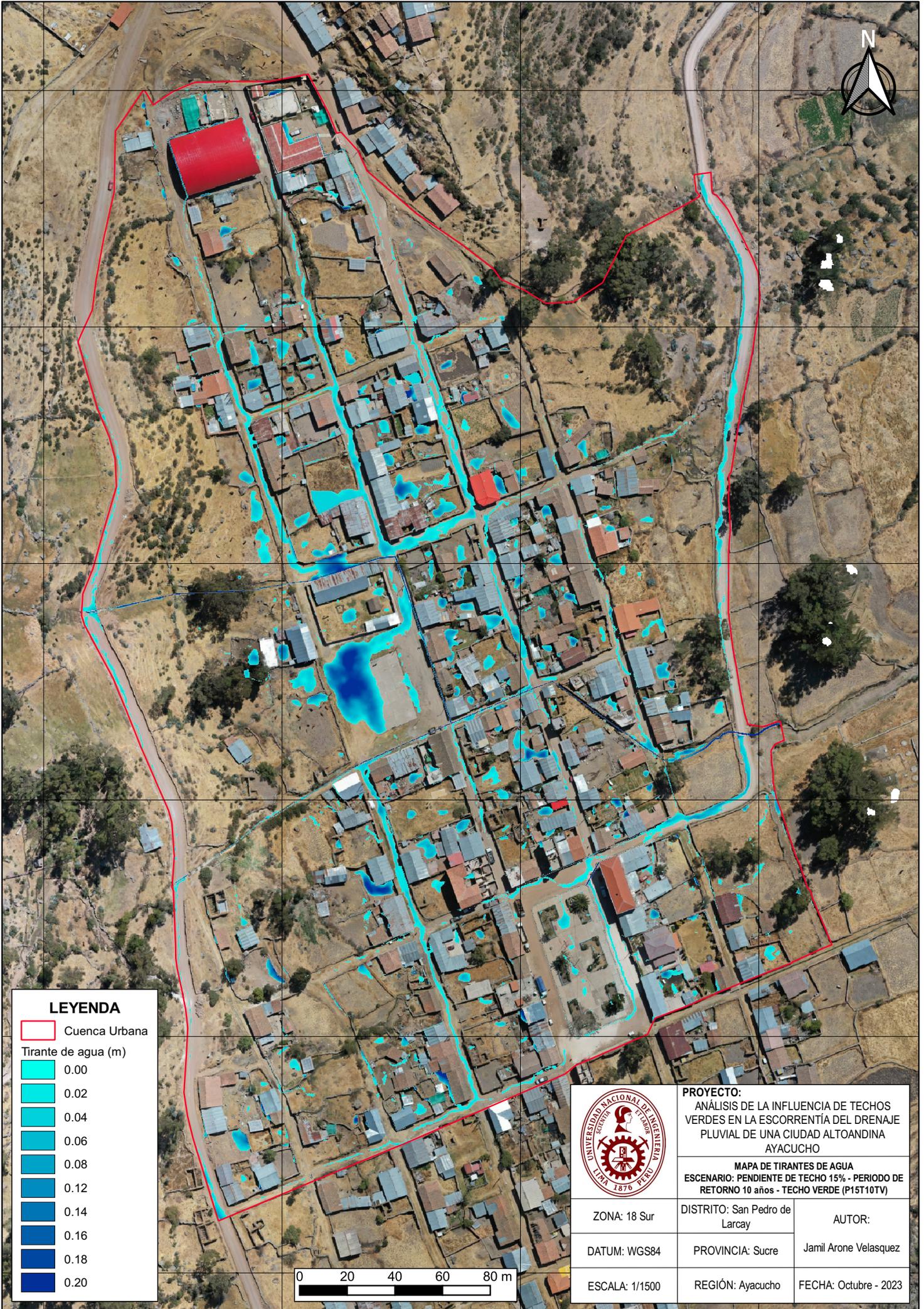
8433200

8433100

8433100

8433000

8433000

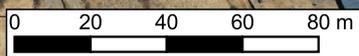


**LEYENDA**

 Cuenca Urbana

Tirante de agua (m)

-  0.00
-  0.02
-  0.04
-  0.06
-  0.08
-  0.12
-  0.14
-  0.16
-  0.18
-  0.20



**PROYECTO:**  
ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DE TECHOS VERDES EN LA ESCORRENTÍA DEL DRENAJE PLUVIAL DE UNA CIUDAD ALTOANDINA AYACUCHO

**MAPA DE TIRANTES DE AGUA**  
ESCENARIO: PENDIENTE DE TECHO 15% - PERIODO DE RETORNO 10 años - TECHO VERDE (P15T10TV)

ZONA: 18 Sur	DISTRITO: San Pedro de Larcay	AUTOR:
DATUM: WGS84	PROVINCIA: Sucre	Jamil Arone Velasquez
ESCALA: 1/1500	REGIÓN: Ayacucho	FECHA: Octubre - 2023

653800

653900

654000

654100

653800

653900

654000

654100

8433500

8433400

8433300

8433200

8433100

8433000

8433500

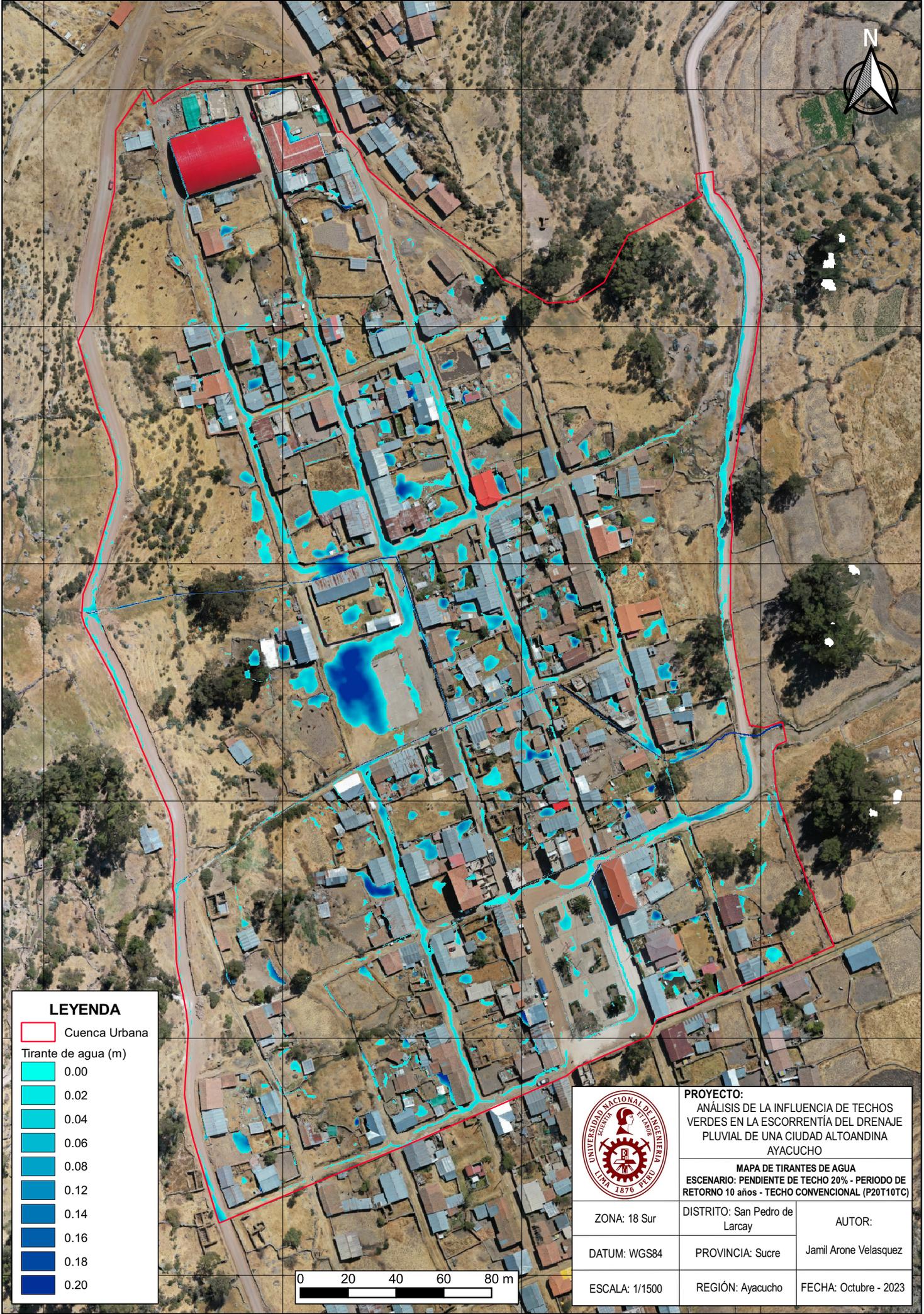
8433400

8433300

8433200

8433100

8433000

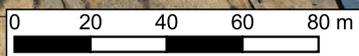


**LEYENDA**

 Cuenca Urbana

Tirante de agua (m)

-  0.00
-  0.02
-  0.04
-  0.06
-  0.08
-  0.12
-  0.14
-  0.16
-  0.18
-  0.20



**PROYECTO:**  
ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DE TECHOS VERDES EN LA ESCORRENTÍA DEL DRENAJE PLUVIAL DE UNA CIUDAD ALTOANDINA AYACUCHO

**MAPA DE TIRANTES DE AGUA**  
ESCENARIO: PENDIENTE DE TECHO 20% - PERIODO DE RETORNO 10 años - TECHO CONVENCIONAL (P20T10TC)

ZONA: 18 Sur	DISTRITO: San Pedro de Larcaay	AUTOR:
DATUM: WGS84	PROVINCIA: Sucre	Jamil Arone Velasquez
ESCALA: 1/1500	REGIÓN: Ayacucho	FECHA: Octubre - 2023

653800

653900

654000

654100

653800

653900

654000

654100

8433500

8433400

8433300

8433200

8433100

8433000

8433500

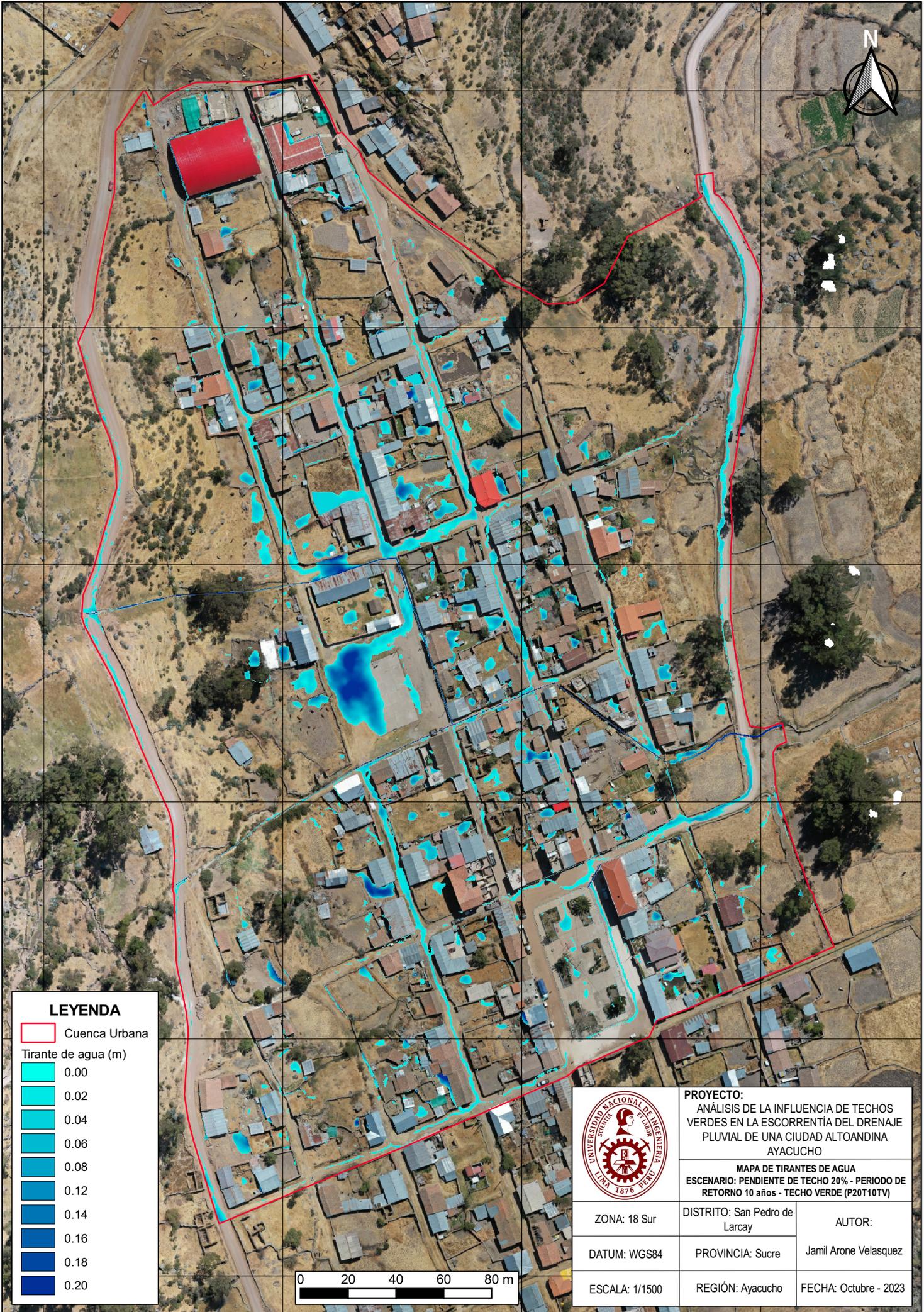
8433400

8433300

8433200

8433100

8433000



**LEYENDA**

- Cuenca Urbana
- Tirante de agua (m)
- 0.00
- 0.02
- 0.04
- 0.06
- 0.08
- 0.12
- 0.14
- 0.16
- 0.18
- 0.20



**PROYECTO:**  
 ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DE TECHOS VERDES EN LA ESCORRENTÍA DEL DRENAJE PLUVIAL DE UNA CIUDAD ALTOANDINA AYACUCHO

**MAPA DE TIRANTES DE AGUA**  
 ESCENARIO: PENDIENTE DE TECHO 20% - PERIODO DE RETORNO 10 años - TECHO VERDE (P20T10TV)

ZONA: 18 Sur	DISTRITO: San Pedro de Larcaay	AUTOR:
DATUM: WGS84	PROVINCIA: Sucre	Jamil Arone Velasquez
ESCALA: 1/1500	REGIÓN: Ayacucho	FECHA: Octubre - 2023

653800

653900

654000

654100