

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ**

**FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA**



**APLICACIÓN DE TÉCNICAS DE DRENAJE URBANO SOSTENIBLE EN DOS  
ZONAS DE LA CIUDAD DE AYACUCHO PARA EL MEJORAMIENTO DE LA  
EVACUACIÓN DE AGUAS PLUVIALES**

**Tesis para obtener el título profesional de INGENIERO CIVIL**

**AUTORES:**

Carlos André Ayon Hurtado

Danny Daniel Vilca Felix

**ASESORA:**

Dra. Iris Violeta Domínguez Talavera

Lima, agosto, 2025

### Informe de Similitud

Yo, .....Iris Violeta Domínguez Talavera.....,  
docente de la Facultad de ...Ciencias e Ingeniería..... de la Pontificia  
Universidad Católica del Perú, asesor(a) de la tesis/el trabajo de investigación titulado:


...Aplicación de técnicas de drenaje urbano sostenible en dos zonas de la ciudad de Ayacucho para el  
mejoramiento de la evacuación de aguas pluviales.....,  
del/de la autor(a)/ de los(as) autores(as): .....

... Carlos André Ayon Hurtado .....  
... Danny Daniel Vilca Felix.....

dejo constancia de lo siguiente:

- El mencionado documento tiene un índice de puntuación de similitud de ..16..%. Así lo consigna el reporte de similitud emitido por el software *Turnitin* el 20/08/2025.
- He revisado con detalle dicho reporte y la Tesis o Trabajo de Suficiencia Profesional, y no se advierte indicios de plagio.
- Las citas a otros autores y sus respectivas referencias cumplen con las pautas académicas.

Lugar y fecha: ...San Miguel, 21 de agosto de 2025.....

Apellidos y nombres del asesor / de la asesora: <u>Domínguez Talavera, Iris Violeta</u>	
DNI: 06508935	Firma 
ORCID: <a href="https://orcid.org/0000-0001-7688-8665">https://orcid.org/0000-0001-7688-8665</a>	

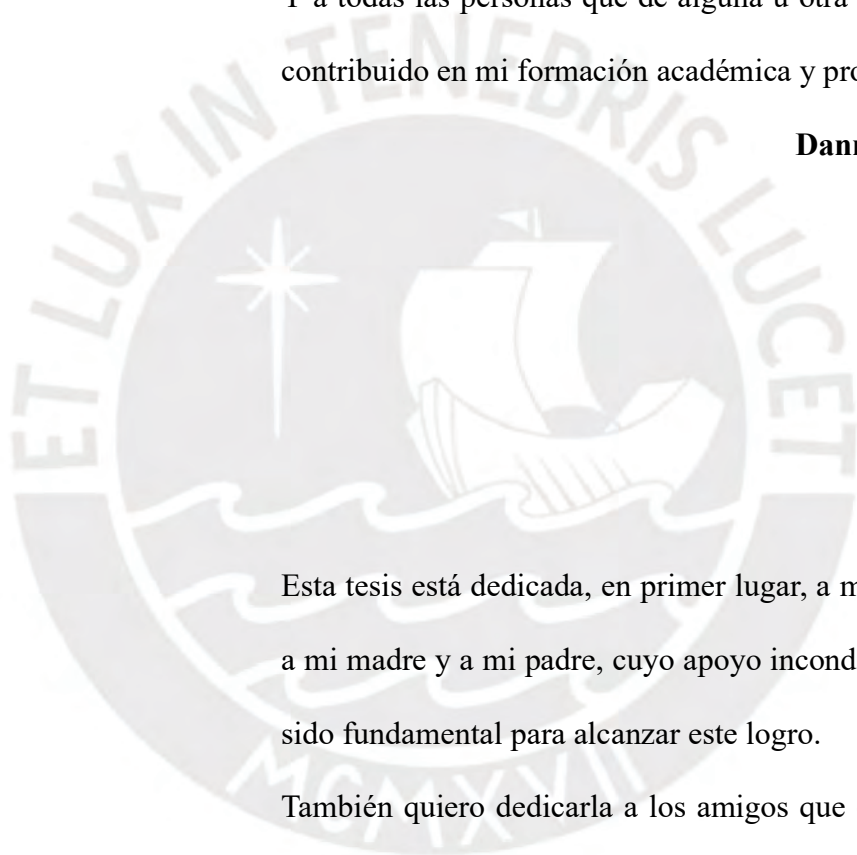
## **Dedicatoria**

A mis padres, por acompañarme siempre, aún en los momentos más difíciles.

A mis hermanos, por ser mi inspiración constante.

Y a todas las personas que de alguna u otra forma, han contribuido en mi formación académica y profesional.

**Danny Daniel**



Esta tesis está dedicada, en primer lugar, a mi familia: a mi madre y a mi padre, cuyo apoyo incondicional ha sido fundamental para alcanzar este logro.

También quiero dedicarla a los amigos que conocí en esta etapa de mi vida, por todas las alegrías, las enseñanzas y las diversas emociones vividas a lo largo de mi experiencia universitaria.

**Carlos André**

## **Agradecimientos**

En primer lugar, nuestro más profundo agradecimiento a Dios, por brindarnos fortaleza e iluminación.

Agradecemos a todos los docentes de la facultad de Ciencias e Ingeniería, de manera especial a nuestra asesora de tesis, la Dra. Iris Violeta Domínguez Talavera, por todas las experiencias compartidas, enseñanzas y consejos que nos sirvieron de guía para la culminación de la presente tesis.



## Resumen

En la actualidad, los sistemas de drenajes urbanos han adquirido cierta complejidad respecto a su gestión. Se siguen creando diversas metodologías que apoyan a la eficiencia de estos drenajes, en dónde se estaría empezando, en estas últimas décadas, a tomar en consideración el impacto que estas pueden generar al ambiente que los rodean, en especial, a los que generan en los recursos hídricos locales.

El siguiente trabajo de investigación tiene como objetivo señalar la importancia de los “Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible” (SuDS) y cómo el uso apropiado de estas técnicas ayuda a evitar inundaciones y a mejorar la calidad de los recursos hídricos locales, tales como ríos, lagos, lagunas, cuencas, etc.

Se analiza la problemática que tiene el sistema de drenaje pluvial en la ciudad de Ayacucho, con enfoque en detenidas zonas de la ciudad para responder cuáles son las principales fuentes de desagüe y cuáles son los efectos que genera a los recursos hídricos locales.

Luego se verifica el cumplimiento de los requisitos que se indican en las normas peruanas para drenaje pluvial. Se aplicará las técnicas establecidas en los “Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenibles (SuDS)” y con las consideraciones brindadas para el diseño SuDS otorgadas por la EPA (Environmental Protection Agency) se elige la opción de sistema de drenaje que se adapta mejor al entorno natural de la ciudad de Ayacucho.

Para la simulación del impacto de este sistema SuDS escogido se llevará a cabo mediante el software: 'Storm Water Management Model' (SWMM) y se analiza los resultados obtenidos. Finalmente, se brinda una propuesta para generar un

sistema de drenaje urbano sostenible en la ciudad de Ayacucho que ayudará a mejorar la eficiencia del drenaje pluvial tradicional que se tiene.

## Índice general

<b>Resumen.....</b>		<b>i</b>
<b>Índice general .....</b>		<b>ii</b>
<b>Índice de Figuras.....</b>		<b>vi</b>
<b>Índice de Tablas.....</b>		<b>x</b>
<b>1</b>	<b>Aspectos generales .....</b>	<b>1</b>
1.1	Introducción .....	1
1.2	Descripción y ubicación de la zona de estudio.....	2
1.3	Situación de la zona de estudio .....	6
1.4	Objetivos del proyecto .....	10
1.4.1	Objetivo general.....	10
1.4.2	Objetivos específicos .....	10
<b>2</b>	<b>Marco teórico.....</b>	<b>11</b>
2.1	Hidrología, importancia y el ciclo hidrológico .....	11
2.1.1	Importancia de la hidrología.....	11
2.1.2	Definiciones de hidrología .....	11
2.1.3	Ciclo hidrológico .....	12
2.1.4	Características fisiográficas .....	14
2.1.5	Análisis de la precipitación .....	15
2.1.6	Curvas de intensidad – duración y frecuencia .....	16
2.1.7	Hietograma de diseño .....	16
2.1.8	Hietograma triangular.....	17
2.1.9	Caudal de diseño .....	17
2.1.10	Cuencas urbanas .....	19
<b>2.2</b>	<b>Principios de la hidráulica para el diseño de drenaje pluvial urbano .....</b>	<b>19</b>

2.2.1	Definiciones básicas .....	19
2.3	Antecedentes del drenaje urbano en el país.....	21
2.3.1	Drenaje urbano en el periodo incaico (Machu Picchu) .....	21
2.4	Marco legal de la gestión de riesgos y la gestión actual del riesgo de inundaciones en el Perú .....	25
2.5	Introducción a los SuDS y otros conceptos de drenaje sostenible en el mundo	26
2.5.1	Water sensitive urban design (WSUD) .....	27
2.5.2	Best management practice (BMP).....	28
2.5.3	Low impact development (lid) .....	28
2.5.4	Green infraestructure (GI).....	29
2.5.5	Integrated urban water management (IUWM).....	30
2.5.6	Alternative techniques (ATs).....	30
2.5.7	Sustainable drainage systems (SuDS) .....	31
2.6	Técnicas aplicadas en los SuDS .....	34
2.6.1	Colector de agua de lluvia .....	34
2.6.2	Techos verdes.....	36
2.6.3	Desconexión de bajante de techo .....	37
2.6.4	Soakaways, zanjas y cámaras de infiltración .....	38
2.6.5	Bio-retención.....	40
2.6.6	Tiras de filtro con vegetación .....	41
2.6.7	Pavimento permeable .....	42
2.6.8	Canales de césped mejorado .....	44
2.6.9	Canales para el secado.....	45
2.6.10	Sistema de tubería perforada.....	46

2.6.11	Tanque de almacenamiento pluvial .....	47
2.7	Valores típicos para diseño de SuDS .....	48
2.7.1	Techos verdes.....	48
2.7.2	Jardines pluviales y celdas de bio-retención.....	48
2.7.3	Pavimento permeable .....	49
2.7.4	Tanques de almacenamiento pluvial .....	50
3	Métodos y datos.....	51
3.1	Enfoque de la investigación.....	51
3.2	Método y diseño de la investigación .....	51
3.3	Fisiografía de las áreas de estudio .....	54
3.3.1	Geomorfología de la cuenca .....	54
3.4	Determinación de las curvas de intensidad-duración-frecuencia.....	60
3.4.1	Análisis pluviométrico .....	60
3.5	Cálculo del tiempo de concentración por el método de Kirpich.....	66
3.6	Cálculo de caudales de diseño por el método racional modificado .....	67
3.7	Estimación de caudal para el programa SWMM .....	76
3.8	Modelado computacional de áreas de estudio .....	78
3.8.1	Consideraciones previas al modelado en SWMM 5.2.....	78
3.8.2	Creación de redes de desagüe pluvial en SWMM 5.2 .....	78
3.9	Propuesta y diseño de SuDS.....	79
3.9.1	Propuesta de SuDS en Cerro La Picota .....	79
3.9.2	Propuesta de SuDS en Plaza Mayor de Huamanga .....	80
3.9.3	Parámetros de diseño de SuDS en SWMM .....	81
4	Análisis y discusión de resultados.....	91
4.1	Caso de Plaza Mayor de Huamanga .....	91

4.1.1	Caso 1 y 2: simulación con caudales de aporte sin SuDS/ con SuDS .....	91
4.1.2	Caso 3 y 4: simulación sin caudales de aporte sin SuDS/ con SuDS .....	93
4.2	Caso de Cerro La Picota.....	98
4.2.1	Caso 1 y 2: simulación con caudales de aporte sin SuDS/ con SuDS .....	98
4.2.2	Caso 3 y 4: simulación sin caudales de aporte sin SuDS/ con SuDS .....	101
4.2.3	Análisis de velocidades máximas .....	106
5	Conclusiones y recomendaciones.....	108
5.1	Conclusiones .....	108
5.2	Recomendaciones .....	111
6	BIBLIOGRAFIA.....	113



## Índice de Figuras

Figura 1	<i>Recurrencia en porcentaje de los desastres en el Perú</i>	1
Figura 2	<i>Huaico en Ayacucho en el año 2009</i>	2
Figura 3	<i>Ubicación del departamento de Ayacucho</i>	3
Figura 4	<i>Ubicación de las zonas de estudio en la ciudad de Ayacucho</i>	4
Figura 5	<i>Primera zona de estudio: Plaza Mayor de Huamanga</i>	5
Figura 6	<i>Segunda zona de estudio: Cerro La Picota</i>	6
Figura 7	<i>Ruta crítica de área afectada en huaico de 2009, Huamanga, Ayacucho</i>	7
Figura 8	<i>Obras de drenaje pluvial en Huamanga como prevención de inundaciones y huaicos</i>	8
Figura 9	<i>Inundación en avenidas principales en el año 2013, Huamanga</i>	9
Figura 10	<i>Ciclo hidrológico del agua</i>	14
Figura 11	<i>Flujo supercrítico, crítico y subcrítico</i>	20
Figura 12	<i>Sistema de drenaje en Machu Picchu</i>	23
Figura 13	<i>Sistema de terrazas agrícolas en Machu Picchu</i>	24
Figura 14	<i>Sistema de andenerías en Machu Picchu</i>	24
Figura 15	<i>Filosofía de los SuDS</i>	32
Figura 16	<i>Efecto de las ciudades en los procesos naturales del agua de lluvia</i>	34
Figura 17	<i>Diseño básico para sistema de recolección de agua de lluvias</i>	35
Figura 18	<i>Techos verdes instalados en la ciudad</i>	36
Figura 19	<i>Ejemplos del sistema de desconexión de bajante de techo</i>	37
Figura 20	<i>Esquema conceptual de soakaways, zanjas y cámaras de infiltración</i>	38
Figura 21	<i>Izquierda (soakaways), centro (zanja de infiltración), derecha (cámara de infiltración)</i>	39
Figura 22	<i>Ejemplo del sistema de Bio-retención</i>	40
Figura 23	<i>Ejemplo de las tiras de filtro con vegetación</i>	42
Figura 24	<i>Esquema conceptual de pavimento permeable</i>	43
Figura 25	<i>Esquema conceptual de pavimento permeable</i>	43
Figura 26	<i>Esquema conceptual de canales de césped permeable</i>	44
Figura 27	<i>Esquema conceptual de canales de césped permeable</i>	45
Figura 28	<i>Sistema de canales para el secado</i>	46
Figura 29	<i>Sistema de tubería perforada</i>	47
Figura 30	<i>Sistema de tanque de almacenamiento AQUACEL</i>	47

Figura 31 <i>Diseño de la investigación</i> .....	52
Figura 32 <i>Topografía de áreas de estudio</i> .....	54
Figura 33 <i>Mapa TIN de áreas de estudio</i> .....	55
Figura 34 <i>Mapas DEM de áreas de estudio</i> .....	55
Figura 35 <i>Curvas de nivel de áreas de estudio</i> .....	56
Figura 36 <i>Delimitación de áreas tributarias de caudal en el área de Plaza Mayor de Huamanga</i> .....	56
Figura 37 <i>Delimitación de áreas tributarias de caudal en el área de Ladera de Cerro la Picota</i> .....	57
Figura 38 <i>Delimitación de cuencas afluentes al área de Ladera del Cerro la Picota</i> .....	59
Figura 39 <i>Delimitación de cuencas afluentes al área de Plaza Mayor de Huamanga</i> .....	60
Figura 40 <i>Curva logarítmica de intensidad-duración-frecuencia</i> .....	65
Figura 41 <i>Coefficiente de escorrentía promedio en área 1 afluente a Cerro La Picota</i> .....	69
Figura 42 <i>Coefficiente de escorrentía promedio en área 2 afluente a Cerro La Picota</i> .....	70
Figura 43 <i>Coefficiente de escorrentía promedio en área 3 afluente a Cerro La Picota</i> .....	71
Figura 44 <i>Coefficiente de escorrentía promedio en área 1 afluente a Plaza Mayor de Huamanga</i> .....	72
Figura 45 <i>Coefficiente de escorrentía promedio en área 2 afluente a Plaza Mayor de Huamanga</i> .....	73
Figura 46 <i>Coefficiente de escorrentía promedio en área 3 afluente a Plaza Mayor de Huamanga</i> .....	74
Figura 47 <i>Coefficiente de escorrentía promedio en área 4 afluente a Plaza Mayor de Huamanga</i> .....	75
Figura 48 <i>Propuesta de SuDS en zona de estudio Cerro La Picota</i> .....	79
Figura 49 <i>Propuesta de SuDS en zona de estudio Plaza Mayor de Huamanga</i> .....	81
Figura 50 <i>Parámetros de superficie de celda de bioretención</i> .....	82
Figura 51 <i>Parámetros de suelo de celda de bioretención</i> .....	82
Figura 52 <i>Parámetros de almacenamiento de celda de bioretención</i> .....	83
Figura 53 <i>Parámetros de superficie de celda de jardín pluvial</i> .....	83
Figura 54 <i>Parámetros de superficie de pavimento permeable</i> .....	84
Figura 55 <i>Parámetros de pavimento del pavimento permeable</i> .....	85
Figura 56 <i>Parámetros de depósito del pavimento permeable</i> .....	85
Figura 57 <i>Parámetros de drenaje del pavimento permeable</i> .....	86
Figura 58 <i>Parámetros de almacenamiento del tanque pluvial</i> .....	87

Figura 59 <i>Parámetros de drenaje del tanque pluvial</i> .....	88
Figura 60 <i>Parámetros de superficie de la cubierta verde</i> .....	88
Figura 61 <i>Parámetros de suelo de la cubierta verde</i> .....	89
Figura 62 <i>Parámetros de material drenante de la cubierta verde</i> .....	90
Figura 63 <i>Ubicación de perfil crítico de la cuenca urbana</i> .....	91
Figura 64 <i>Capacidad crítica del perfil con caudal de aporte sin implementación de SuDS</i> ...	92
Figura 65 <i>Capacidad crítica del perfil con caudal de aporte con implementación de SuDS</i> ..	92
Figura 66 <i>Capacidad crítica del perfil sin caudal de aporte sin implementación de SuDS</i> ....	93
Figura 67 <i>Capacidad crítica del perfil sin caudal de aporte con implementación de SuDS</i> ...	93
Figura 68 <i>Afluencia de puntos de control de salida, sin SuDS (izquierda), con SuDS (derecha)</i> .....	94
Figura 69 <i>Ubicación de puntos de control de salida críticos</i> .....	94
Figura 70 <i>Comparación de hidrogramas de salida del punto de control O-1</i> .....	95
Figura 71 <i>Comparación de hidrogramas de salida del punto de control O-2</i> .....	96
Figura 72 <i>Comparación de hidrogramas de salida del punto de control O-3</i> .....	97
Figura 73 <i>Comparación de hidrogramas de salida del punto de control O-4</i> .....	97
Figura 74 <i>Ubicación de perfil crítico de la cuenca urbana</i> .....	99
Figura 75 <i>Capacidad crítica del perfil 01 con caudal de aporte sin implementación de SuDS</i> .....	99
Figura 76 <i>Capacidad crítica del perfil 02 con caudal de aporte sin implementación de SuDS</i> .....	100
Figura 77 <i>Capacidad crítica del perfil 01 con caudal de aporte con implementación de SuDS</i> .....	100
Figura 78 <i>Capacidad crítica del perfil 02 con caudal de aporte con implementación de SuDS</i> .....	100
Figura 79 <i>Capacidad crítica del perfil 01 sin caudal de aporte sin implementación de SuDS</i> .....	101
Figura 80 <i>Capacidad crítica del perfil 02 sin caudal de aporte sin implementación de SuDS</i> .....	102
Figura 81 <i>Capacidad crítica del perfil 01 sin caudal de aporte con implementación de SuDS</i> .....	102
Figura 82 <i>Capacidad crítica del perfil 02 sin caudal de aporte con implementación de SuDS</i> .....	103

Figura 83 <i>Afluencia de puntos de control de salida, sin SuDS (izquierda), con SuDS (derecha)</i> .....	104
Figura 84 <i>Ubicación de puntos de control de salida críticos</i> .....	105
Figura 85 <i>Comparación de hidrogramas de salida del punto de control O-2</i> .....	105
Figura 86 <i>Velocidades máximas en la zona de Cerro La Picota</i> .....	106



## Índice de Tablas

Tabla 1 <i>Resistencia del concreto asociado al tirante y máximas velocidades</i> .....	21
Tabla 2 <i>Filosofía de los SuDS, comparación entre los SuDS y drenajes convencionales</i> .....	33
<b>Tabla 3</b> <i>Valores típicos para diseño de techos verdes en SWMM</i> .....	48
<b>Tabla 4</b> <i>Valores típicos para diseño de jardines pluviales y celdas de bioretención en SWMM</i> .....	49
<b>Tabla 5</b> <i>Valores típicos para diseño de jardines pluviales y celdas de bioretención en SWMM</i> .....	50
Tabla 6 <i>Áreas tributarias de caudal en el área de Plaza Mayor de Huamanga</i> .....	57
Tabla 7 <i>Áreas tributarias de caudal en el área de Ladera de Cerro la Picota</i> .....	58
Tabla 8 <i>Áreas de cuencas afluentes al área de Ladera de Cerro la Picota</i> .....	58
Tabla 9 <i>Áreas de cuencas afluentes al área de Plaza Mayor de Huamanga</i> .....	59
Tabla 10 <i>Prueba de bondad del ajuste de Kolmogorov Smirnov</i> .....	63
Tabla 11 <i>Precipitaciones máximas anuales en 24 horas según la distribución utilizada</i> <i>(Gamma)</i> .....	64
Tabla 12 <i>Coeficientes de escorrentía para áreas identificadas en la ciudad de Huamanga</i> ...	68
Tabla 13 <i>Estimación de caudales de cuencas afluentes al área de Cerro La Picota</i> .....	76
Tabla 14 <i>Estimación de caudales de cuencas afluentes al área de la Plaza Mayor de</i> <i>Huamanga</i> .....	76
Tabla 15 <i>Hietograma de diseño para un TR de 50 años</i> .....	77
Tabla 16 <i>Estimación de volumen de almacenamiento de tanque pluvial</i> .....	87

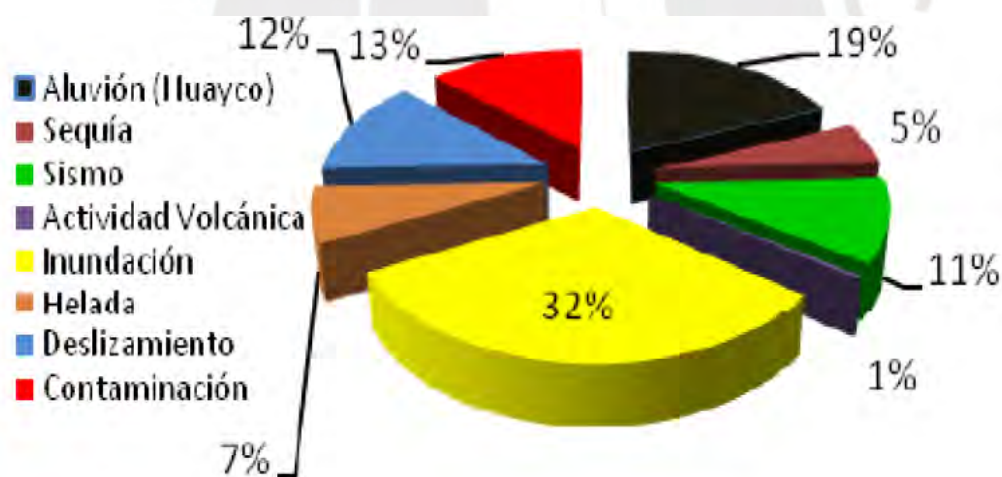
## 1 Aspectos generales

### 1.1 Introducción

El Perú, al estar conformado por tres regiones geográficas continentales claramente diferenciadas -costa, sierra y selva-, presenta una compleja diversidad climática y topográfica que lo convierte en un territorio altamente vulnerable frente a una amplia gama de desastres naturales. De acuerdo con el Observatorio Nacional de Seguridad y Riesgo Hídrico (2010), las inundaciones constituyen el fenómeno natural más frecuente en el país, afectando significativamente a la mayoría de sus regiones. No obstante, es fundamental poner especial atención en los aluviones, o huaicos, que ocupan el segundo lugar en frecuencia y representan un peligro latente, particularmente en las quebradas altoandinas.

**Figura 1**

*Recurrencia en porcentaje de los desastres en el Perú*



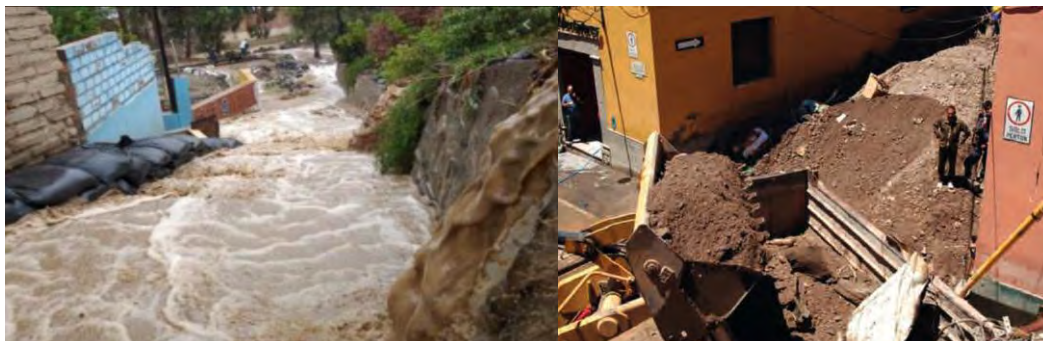
*Nota:* El gráfico muestra el porcentaje de desastres con mayor incidencia en el territorio peruano al año 2011, según datos del Plan de prevención ante la presencia de fenómenos naturales por inundaciones, deslizamientos, huaicos y sequías (OSNIRH & DEPHM, 2010, p. 37).

Referente a este último, la región de Ayacucho afectada constantemente por este fenómeno, con daños constantes presentados hasta diciembre del 2009, alarmó a las

autoridades locales a invertir en el mejoramiento de sus sistemas de drenaje urbano debido a los perjuicios materiales (INDECI, 2023).

## Figura 2

*Huaico en Ayacucho en el año 2009*



*Nota:* Se observa que existe un caudal importante debido a niveles elevados de precipitación, así como el daño ocasionado en la zona. Adaptado de *Huaico en Ayacucho 2009*

[Fotografía], por Diario Correo, 2013, <https://diariocorreo.pe/>

De esta manera, la alternativa propuesta en la zona para el mejoramiento de la gestión de la evacuación de aguas pluviales son los “Sistemas de Drenaje Urbano Sostenible (SuDS)”, los cuales han ido adquiriendo mayor notoriedad e importancia con el pasar de los años, si bien el Perú no es ajeno a estas técnicas, su uso en el país aún es muy poco conocido y utilizado. (Perales et al., 2019)

La presente tesis enfatizará la importancia y el impacto general que tendrá el SuDS en el entorno de la ciudad de Ayacucho mediante una simulación en el programa SWMM (Storm Water Management Model) para así verificar la hipótesis de que estos sistemas son más eficientes que los convencionales.

### 1.2 Descripción y ubicación de la zona de estudio

Para el presente trabajo de investigación se abarcan las zonas que sean representativas de la región de Ayacucho, por esto se toman en cuenta las zonas de estudio para: el centro de

la ciudad representado por la ‘Plaza Mayor de Huamanga’ y las periferias de la ciudad representadas por las laderas del ‘Cerro La Picota’.

El departamento de Ayacucho se encuentra ubicado en la zona sur - central de Los Andes peruanos, en el área meridional de Los Andes.

### Figura 3

*Ubicación del departamento de Ayacucho*

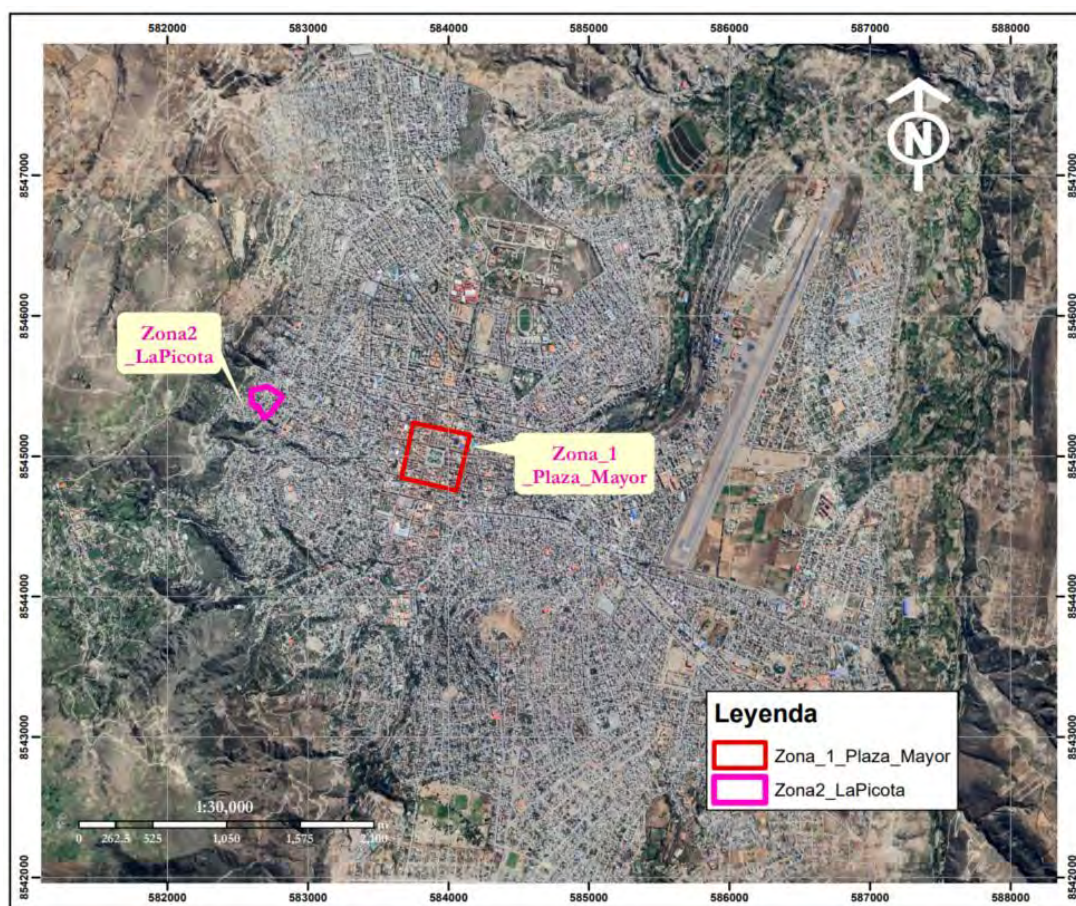


*Nota:* Se muestra de amarillo la ubicación del departamento de Ayacucho. Mapa georeferenciado en coordenadas WSG84, coordenadas geográficas.

El departamento, cuya capital Ayacucho está situada a 2761 m.s.n.m. La superficie del departamento posee un relieve muy accidentado, donde los ríos Pampas, Apurímac y Mantaro forman increíbles cañones. En las punas o altas mesetas andinas el relieve presenta pampas onduladas, y en el sur el nevado Sara - Sara es el más importante. Su suelo es muy accidentado por el cruce de dos cordilleras que lo divide en tres unidades orográficas: montañosa y tropical al norte, de abrupta serranía al centro, y de altiplanicies al sur. (INEI et al., 2015)

**Figura 4**

*Ubicación de las zonas de estudio en la ciudad de Ayacucho*



*Nota:* Se muestra de rojo la ubicación de la zona 1 de estudio (Plaza Mayor); y, de color magenta la ubicación de la zona 2 (Cerro la Picota). Mapa georeferenciado en coordenadas UTM WSG84, Zona 18S.

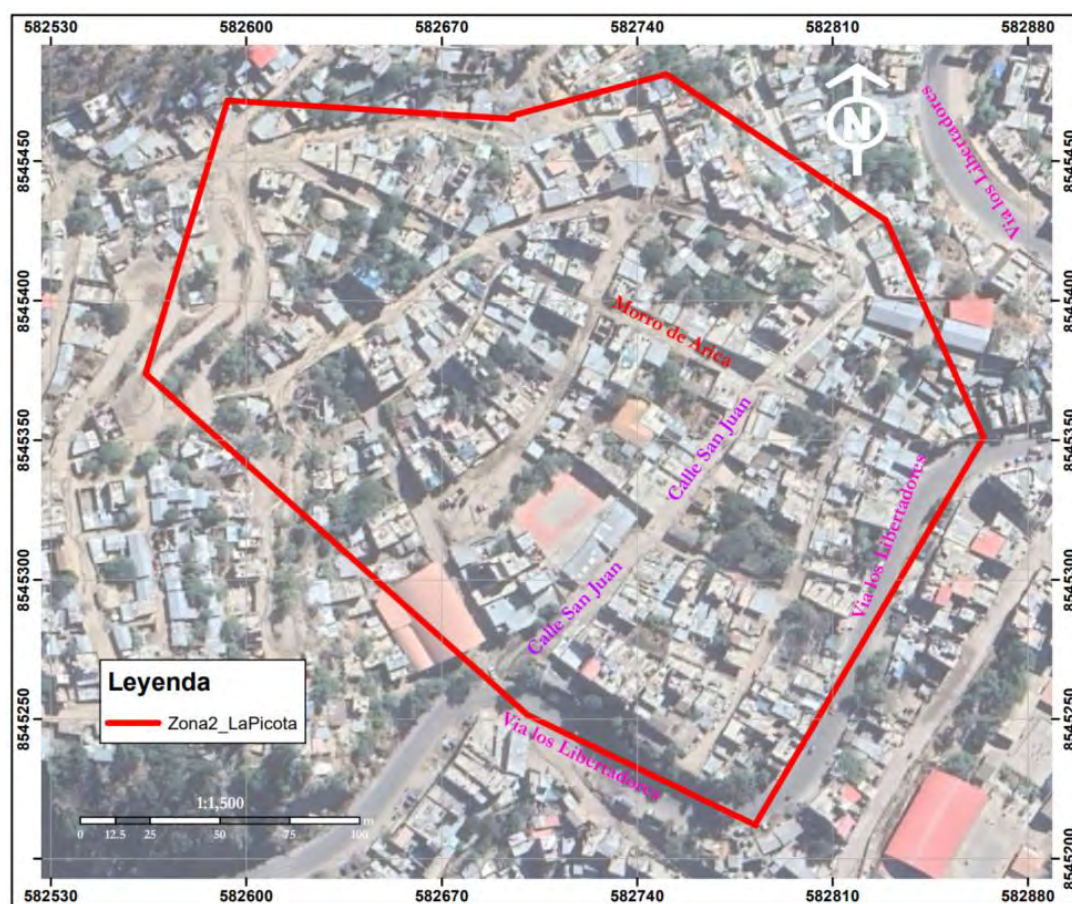
Las zonas de estudio se encuentran ubicadas en la provincia de Huamanga, la cual se encuentra ubicado en el norte - central del departamento de Ayacucho, tiene un área de 2981.37 Km<sup>2</sup> y una altura de 2628 m.s.n.m

La Plaza Mayor de Huamanga será la primera zona de estudio, el área en donde se dará lugar el proyecto de investigación se encuentra comprendida por el norte con el Jr. Bellido, por el oeste se encuentra la Av. Miguel Grau y la Av. Garcilazo, por el este el Jr. Tres Máscaras y por el sur Jr. San Martín.



**Figura 6**

*Segunda zona de estudio: Cerro La Picota*



*Nota:* Se ha delimitado con color rojo el área de estudio que posteriormente fue levantada topográficamente, y georeferenciada en coordenada UTM WSG84, Zona 18S.

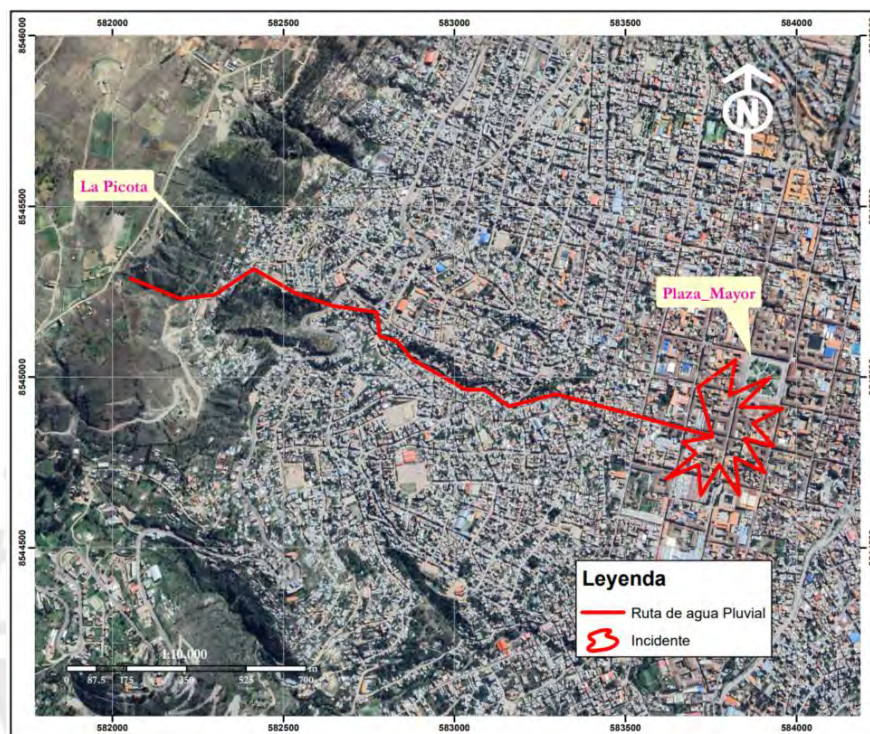
### 1.3 Situación de la zona de estudio

El miércoles 16 de diciembre del 2009 entre las 17:20 horas y 18:30 horas aproximadamente, se dio lugar un fuerte huaico en la ciudad de Huamanga, Ayacucho. Esto se debió a las intensas precipitaciones pluviales junto con una granizada, ocasionando que las quebradas de Piscotambo, Pueblo Libre y Río Seco reproduzcan huaicos e inundaciones en las viviendas, generando afectación en las oficinas del Gobierno Regional, vías de acceso y unidades de transporte público y particular, especialmente en la intersección del Jirón 28 de Julio con la calle San Martín (cerca de la Plaza Mayor de Huamanga). (INDECI, 2023)

En la siguiente imagen se puede apreciar un croquis del recorrido del huaico que afectó al distrito de Huamanga, el cual partió desde el Cerro La Picota hacia la Avenida San Martín.

**Figura 7**

*Ruta crítica de área afectada en huaico de 2009, Huamanga, Ayacucho*



*Nota:* Se muestra la ruta que siguió el huaico en el año 2009. Adaptado de *diario digital Andina Agencia Peruana de Noticias*, 2009, Andina (<https://andina.pe>).

El Gobierno Regional reportó un total de 9 viviendas destruidas, afectadas por el paso del huaico, posteriormente, el MINSA registró 9 fallecidos y 30 personas heridas a consecuencias de este desastre natural. (Diario Correo, 2013)(INEI et al., 2015)(Leon Nina, 2016)

Debido a esta situación, el Gobierno Regional y el Ministerio de Vivienda tomaron la decisión de iniciar la construcción de un moderno sistema de drenaje pluvial que transportara el agua pluvial por debajo de las calles por una tubería de 2.5 m de diámetro. El proyecto de drenaje pluvial en el distrito de Huamanga se dividió en 4 etapas, las 3 primeras consistieron

en la construcción del drenaje urbano pluvial en los Jirones 9 de diciembre, Callao, Cusco, Lima, Arequipa y F. Vivanco. La última etapa se trabajó en las arterias principales de la ciudad: Jr. Quinua, Manco Cápac, M. Bellido y Mariscal (principales calles del centro histórico); el proyecto que comenzó en el año 2011 tuvo una inversión total de más de 100 millones de soles. (Leon Nina, 2016; Municipalidad Provincial de Huamanga, 2014)

### Figura 8

*Obras de drenaje pluvial en Huamanga como prevención de inundaciones y huaicos*



*Nota:* Las obras de drenaje pluvial mostradas han sido la respuesta a los problemas de huaicos e inundaciones en la zona de estudio, y fueron finalizadas en el año 2014, 5 años después del evento del 2009. Adaptado de *diario digital Municipalidad Provincial de Huamanga [Fotografía]*, 2014, Municipalidad de Huamanga (<https://munihuamanga.gob.pe/>)

Si bien la construcción de estos drenajes pluviales convencionales ha apoyado a varias calles del distrito de Huamanga con la evacuación de las aguas pluviales, aun se siguen viendo en partes de la ciudad el efecto de las intensas precipitaciones a las cuales se enfrenta este territorio con bastante recurrencia.(Defensa Civil Ayacucho, 2015)

## Figura 9

*Inundación en avenidas principales en el año 2013, Huamanga*



*Nota:* Inundación de avenidas circundantes a la Plaza Mayor antes de la construcción del drenaje pluvial mejorado. Adaptado de *Lluvia deja serios daños en Huamanga [Fotografía]*, 2013, Diario Correo (<https://diariocorreo.pe/>).

Estas inundaciones usualmente generan daños en las principales calles de la ciudad, muy cerca de la Plaza Mayor de Huamanga y en las casas construidas en las laderas del Cerro La Picota, ocasionando obstrucciones en una de las vías principales del distrito, denominada vía Los Libertadores. (Defensa Civil Ayacucho, 2015)

En esta investigación se busca destacar cómo el crecimiento urbano acelerado y no planificado ha modificado significativamente el ciclo hidrológico natural, especialmente en zonas densamente urbanizadas donde predominan superficies impermeables y se reduce la capacidad de infiltración del suelo (Ress et al., 2020). Si bien los sistemas de drenaje convencionales están diseñados para evacuar rápidamente las aguas pluviales y prevenir inundaciones, no abordan los impactos acumulativos que dicho crecimiento urbano genera en el entorno. Es en este contexto que las técnicas de drenaje urbano sostenible (SuDS) ofrecen una alternativa más integral, ya que no solo permiten evacuar el agua de escorrentía, sino que también contribuyen a restablecer procesos naturales como la infiltración, el almacenamiento

local y la reutilización del recurso hídrico, mitigando así los efectos negativos del desarrollo urbano desordenado (Kellagher et al., 2015).

#### **1.4 Objetivos del proyecto**

##### **1.4.1 Objetivo general**

Elaborar una propuesta de implementación de técnicas de drenaje sostenible, en particular, en las zonas de la Plaza Mayor de Huamanga y las laderas del cerro La Picota, para mejorar el desempeño del sistema de drenaje pluvial de la ciudad de Ayacucho, aumentando la eficiencia en el manejo de agua de lluvia.

##### **1.4.2 Objetivos específicos**

Describir y procesar las condiciones geológicas e hidrológicas de la ciudad de Ayacucho

Realizar una simulación con el software SWMM de las técnicas de drenaje urbano sostenible tanto para la Plaza Mayor de Huamanga como para las laderas del Cerro La Picota

Seleccionar las técnicas de drenaje sostenible más adecuado para las zonas de estudio

Analizar los resultados de la simulación de los sistemas de drenaje sostenible obtenidos con el software SWMM.

Realizar un análisis comparativo del sistema de SuDS frente al sistema convencional existente

## 2 Marco teórico

### 2.1 Hidrología, importancia y el ciclo hidrológico

#### 2.1.1 Importancia de la hidrología

En la actualidad, existe un incremento desproporcionado de la población mundial y esto genera una demanda grande de los recursos hídricos. Es necesario para esto generar conciencia de la utilidad y el aprovechamiento del agua ya que no siempre es posible satisfacer con aquellas necesidades que se generan en poblados con un determinado número de habitantes (Valentín, 2007). No obstante, si bien la escasez de este recurso es de vital importancia, también lo es el exceso de este recurso en determinadas zonas ya que esto puede representar la existencia de huaicos e inundaciones. (INDECI, 2023) Es aquí donde recae la importancia del estudio de la hidrología local por parte de los profesionales avocados a la materia como ingenieros civiles, agrónomos, etc. Esto es debido que, al estudiar y comprender mejor el comportamiento y el uso del agua, estos profesionales serían capaces de crear proyectos para almacenamiento que apoyen en la escasez de este recurso en periodos de bajas precipitaciones o crear sistemas de drenajes para el caso de inundaciones cuando exista acumulación descontrolada del agua. (Aranda Campos, 1998)

#### 2.1.2 Definiciones de hidrología

Según el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS):

“Ciencia que abarca la ocurrencia, distribución, movimiento y propiedades de los recursos hídricos del planeta, así también como la relación entre el medio ambiente y el ciclo hidrológico.” (Valentín, 2007)

Según el Consejo Federal para la Ciencia y Tecnología (U.S):

“Ciencia que trata de las aguas de la tierra, su ocurrencia, circulación y distribución. Descripción de las propiedades tanto físicas como químicas de este recurso, su influencia en

el medio ambiente y su relación con los seres vivos. Se debe tener en cuenta la historia completa del agua sobre la tierra.” (Davie & Quinn, 2019)

Según la Organización Meteorológica Mundial:

“Ciencia que estudia los procesos que rigen el agotamiento y recuperación de los recursos hídricos en las áreas de la corteza terrestre y en las diversas fases del ciclo natural del agua”. (Langbein & Iseri, 1960)

### **2.1.3 Ciclo hidrológico**

El ciclo hidrológico o ciclo natural del agua es el conjunto de procesos donde el agua es transportada por medio de la evaporación desde la superficie de la tierra y fuentes hídricas como océanos, lagos, ríos, etc. hacia la atmósfera, así como, los procesos inversos que generan el retorno de este elemento a la tierra principalmente por precipitación. (Langbein & Iseri, 1960)

Según Campos Aranda, explica en su libro Procesos del ciclo hidrológico (1998) se pueden diferenciar las siguientes fases del ciclo hidrológico o ciclo natural del agua en:

Evaporación

Es según muchos especialistas, la primera de las fases en el ciclo hidrológico donde el agua de la tierra pasa del estado líquido al gaseoso y es transportada por los vientos continentales. (Valentín, 2007)

Condensación:

Bajo ciertas condiciones meteorológicas, el vapor de agua que fue transportado es condensado y forma las nubes. (Davie & Quinn, 2019)

Precipitación:

Las nubes generadas por la condensación del vapor de agua producen las precipitaciones que es el regreso del agua a su estado líquido, el cual caerá por medio de la gravedad hacia su regreso a la superficie de la tierra. Es importante señalar que no toda el

agua llegará a la superficie, en el camino existirá una porción que se evaporará y otra quedará retenida en la vegetación, edificios, carreteras, etc. Luego de esto, una gran porción del agua repetirá el ciclo evaporándose, llegando a la atmósfera. (Davie & Quinn, 2019)

#### Escorrentía superficial

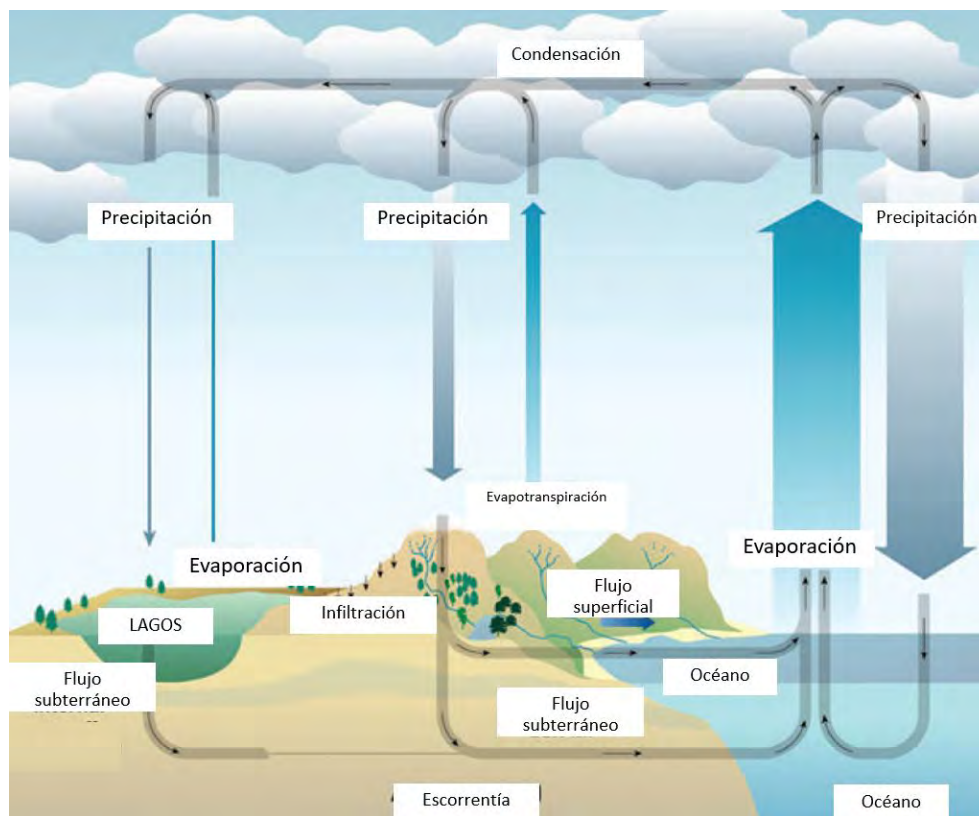
El agua de lluvia en exceso puede trasladarse por las superficies de la tierra, este proceso se denomina escorrentía superficial. Esta agua llega a formar surcos, luego arroyos desembocando en los ríos llegando a los lagos, lagunas y mares para volver a evaporarse. (Aranda Campos, 1998)

#### Infiltración:

Otra parte de la precipitación penetrará la superficie de la tierra y quedará almacenada en el suelo formando parte de la humedad natural para finalmente ser evaporada por acción del cambio de temperatura. Si el agua que infiltra penetra hasta la zona saturada del suelo y forma parte del flujo de agua subterránea, a este proceso se le denominará percolación. (Davie & Quinn, 2019)

#### Evapotranspiración:

Cuando el agua infiltra y se mantiene retenida, una parte puede llegar a ser transpirada por medio de la vegetación, como no es tan sencillo discernir entre los procesos de evaporación y transpiración se tratan de englobar en un solo término el cual se denominará evapotranspiración. (Davie & Quinn, 2019)

**Figura 10***Ciclo hidrológico del agua*

*Nota:* Se muestra un esquema con los principales eventos, y componentes del ciclo hidrológico. Tomado de *Fundamentals of Hydrology* (p. 9), por Davie Tim, 2019, Routledge.

## 2.1.4 Características fisiográficas

### 2.1.4.1 La geomorfología

#### *Área de la cuenca*

Es el área plana de proyección horizontal, encerrada por el parteaguas.

#### *Forma de la cuenca*

Coefficiente de compacidad, explica el tipo de flujo en la cuenca.

Relación de elongación, relaciona la geometría de la cuenca, de manera que mientras más alargada y tienda a una forma rectangular, más segura es, porque el tiempo de concentración será mayor, pues las aguas no se acumulan en tiempos similares.

Tamaño de la cuenca, está ligado al caudal que puede captar

Elongación media, mínima y máxima de la cuenca, relaciona la velocidad de escurrimiento en la cuenca.

### *Red de drenaje*

Sistema de cauces por los que fluyen los escurrimientos superficiales y subterráneos, para poder describir la red de drenaje se necesita: la elevación mínima, máxima del cauce principal, pendiente media del cauce principal: desnivel entre los extremos, dividido entre la longitud en planta; y, pendiente ponderada: divide el cauce en tramos de igual longitud, para calcular las pendientes. (Chow, 2004)

### *Condición hidrológica*

Ayuda a determinar la permeabilidad de la cuenca, qué tan permeable es el entorno y se puede estimar, comúnmente, mediante: el método de número de curva o a través del coeficiente de escurrimiento del método racional americano.

El número de curva (SCS) considera una escala 1 a 100, en donde 100 es nada permeable, puede ser un suelo habitado, cubierto de concreto, que no permita infiltración; a diferencia de un número más bajo que indique permeabilidad, como suelos con pastizales, bosques.

El coeficiente de escorrentía o escurrimiento (RA), hace algo similar en una escala de 0 a 1, en donde 1 es un suelo menos permeable, que permite mayor escurrimiento superficial, un uso que impide la infiltración y valores más pequeños permiten más infiltración. (Chow, 2004)

## **2.1.5 Análisis de la precipitación**

### ***2.1.5.1 Precipitación***

Fenómeno físico que consiste en la transferencia de volúmenes de agua de la atmósfera a la superficie terrestre. Se mide a través de pluviómetros, en unidad de mm,

profundidad de precipitación. Hay pluviómetros convencionales o automáticas. (Mónica, 2011)

#### **2.1.5.2 Intensidad de la Lluvia**

Es la altura de precipitación medida en un intervalo de tiempo, se mide en mm/h. (Wilmer, 2011)

#### **2.1.5.3 Hietograma**

Es un diagrama de barras que indica la intensidad de lluvia en el tiempo, dividido en intervalos iguales. (Wilmer, 2011)

#### **2.1.5.4 Precipitación Media**

Distribución media de la precipitación en una cuenca, puede determinarse por un promedio aritmético, polígonos de Thiessen o Isoyetas. (Mónica, 2011)

#### **2.1.6 Curvas de intensidad – duración y frecuencia**

Son esenciales para la elaboración de los estudios hidrológicos, porque contienen la información de la precipitación asociadas a diferentes duraciones y a diferentes frecuencias o periodos de retorno. Estas curvas se obtienen a partir de análisis estadísticos y ajustes de datos probabilísticos para un sitio o una región. (Chávez Céspedes & Lara Camarena, 2020)

La información de estas curvas proviene de las estaciones pluviométricas o pluviográficas con las que se cuente. Si no se dispone de pluviógrafos sino de valores de máxima precipitación diaria de 24h, se determinarán las curvas IDF a través de las ecuaciones de Dyck y Peschke, Bell ,etc.

#### **2.1.7 Hietograma de diseño**

Se necesitan de las curvas IDF para llegar a los hietogramas de diseño, estos hietogramas ya sean las curvas IDF o el hietograma de diseño se pueden usar según sea conveniente según el software a usarse. (Autoridad Nacional del Agua, 2010)

Cuando se desconoce la distribución de la precipitación en el tiempo, se pueden asumir patrones tipo triángulo o a través del método del bloque alterno.

### 2.1.8 Hietograma triangular

Está definido por la precipitación  $P$  durante un tiempo  $T_d$ , que es la base del triángulo, mientras que la altura se expresa como:

$$h = \frac{2P}{T_d}$$

El tiempo pico  $T_a$  (el tiempo que ha transcurrido de base hasta la máxima de la precipitación acumulada), el tiempo de recesión o base  $T_b$  (es el total de precipitación), y el coeficiente de avance de la tormenta  $r$  igual que la razón de  $T_a$  y  $T_d$

$$r = \frac{T_a}{T_d}$$

$$T_b = T_d - T_a = (1 - r)T_d$$

Donde  $r$ , puede estimarse de tormentas de estaciones pluviográficas cercanas o tomarse igual a 0.6.

Es importante contar con un hietograma de diseño ya que este presenta la información de la intensidad de la lluvia asociada a una duración y a un periodo de retorno, el tiempo de retorno se asigna de acuerdo con el tipo de obra que se realizará.

### 2.1.9 Caudal de diseño

Puede ser obtenido mediante el método racional americano, el hidrograma unitario u otros procedimientos como simulación hidrológica.

El método racional debe ser empleado en cuencas pequeñas

$$Q = 0.278 i \sum_{j=1}^m C_j A_j$$

Donde:

Q: Caudal pico en m<sup>3</sup>/s

i: Intensidad de la lluvia en mm/h

A<sub>j</sub>: Es el área de drenaje de la j-ésima subcuenca en Km<sup>2</sup>

C<sub>j</sub>: Es el coeficiente de escorrentía para la j-ésima subcuenca

m: número de subcuenca drenada por alcantarillas o canales

### **2.1.9.1 Intensidad de la lluvia**

La intensidad de precipitación debe asociarse a una duración de tormenta, la cual debe ser lo suficientemente prolongada para que ocurra el escurrimiento y formar los cauces principales que alimentan y drenan en un área en específico. Esta intensidad está asociada al tiempo de concentración, que es igual al tiempo de recorrido desde el punto mas lejano de la cuenca hasta que el agua ingresa a las obras de drenaje. (Lavado & Santos, 2014)

El tiempo de flujo ( $t_f$ ) puede ser calculado mediante

$$t_f = \sum_{i=1}^n \frac{L_i}{V_i}$$

Donde:

L<sub>i</sub>: es la longitud del i-ésimo conducto a lo largo de la trayectoria del flujo

V<sub>i</sub>: es la velocidad del flujo en el mismo

El  $t_c$  no debe ser menor a 10 minutos

### **2.1.9.2 Área de drenaje**

Debe determinarse el tamaño y la forma de la cuenca o subcuenca en consideración.

El área de drenaje a medir es aquella que contribuye caudal a la infraestructura que se está diseñando, así como la subcuenca de drenaje que contribuya cada punto de ingreso en la misma. La divisoria debe seguir el límite real de la cuenca. (Valentín, 2007)

### **2.1.10 Cuencas urbanas**

Son aquellas cuencas cuyas condiciones se van modificando por efecto de la mancha urbana conforme pasa el tiempo. En un medio urbano, se presentan trazos de calle, zonas con construcciones, parques; es decir se cuenta con un área que ya está muy modificado, es por ello por lo que es difícil encontrar grandes áreas que cuenten con las mismas características, además ya no se presentan grandes áreas que cuenten con bosques, con pastizales, cultivos.

El escurrimiento en estas zonas difiere de las condiciones del terreno natural, por lo que se tiene que introducir otros usos del suelo, relacionado a las distribuciones de las calles, además en estas vialidades se debe conocer los materiales que lo componen. (Kellagher et al., 2015)

Las características de la cuenca urbana se obtienen mediante levantamientos topográficos, mapas de usos de suelo y la precipitación asociadas a las cuencas naturales que las comprenden.

## **2.2 Principios de la hidráulica para el diseño de drenaje pluvial urbano**

En el diseño de drenaje pluvial urbano, independientemente del elemento que se use, ya sea un sistema por tuberías o sistemas por canales, se considera que el flujo es en canal abierto, a menos que se dimensione una línea de impulsión por bombeo. (Perales et al., 2019)

### **2.2.1 Definiciones básicas**

#### ***2.2.1.1 Compresibilidad de fluidos***

Existen fluidos poco compresibles y muy compresibles, por ejemplo, los líquidos son fluidos poco compresibles, y los gases son fluidos muy compresibles, pero para efectos de los cálculos hidráulicos, se define a los líquidos como flujo incompresible, por lo tanto, su densidad es constante.

### 2.2.1.2 Flujo laminar y turbulento

El flujo depende del número adimensional de Reynolds ( $Re$ ), para  $Re > 4000$  se consideran flujos turbulentos y cuando son menores a 2300 se consideran flujos laminares.

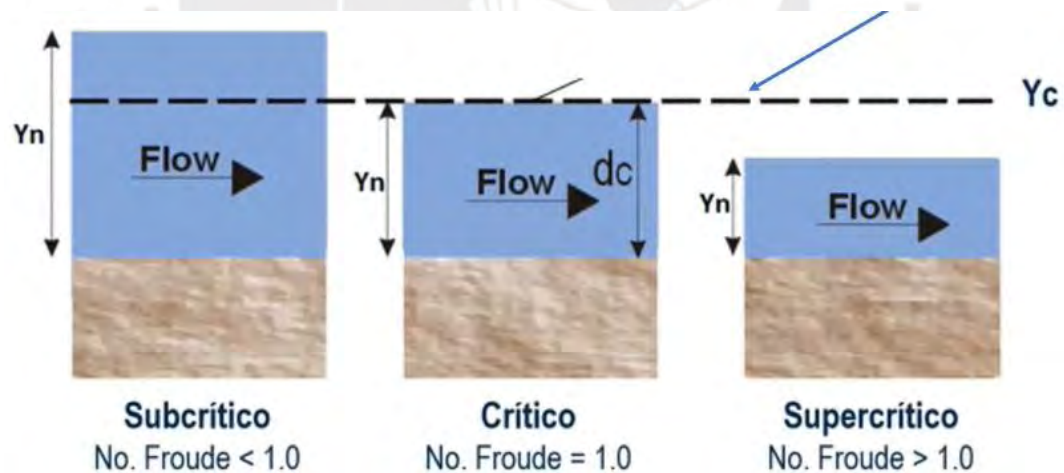
Para sistemas de drenaje urbano se considera que el diseño debe funcionar bajo flujo turbulento, porque no hay forma de hacerlo laminar, ni siquiera en un sistema de estanque de retención, es decir, el comportamiento real de un fluido es turbulento.

### 2.2.1.3 Flujo subcrítico y supercrítico

El flujo supercrítico, se caracteriza por un tirante reducido lo que facilita la propuesta de menores alturas, en tanto el flujo subcrítico se caracteriza por tirantes altos. La desventaja del primero respecto al segundo se basa en que el caso supercrítico presenta altas velocidades ya que esto ocurre en zonas con cambios bruscos de pendiente y/o pendientes altas.

**Figura 11**

*Flujo supercrítico, crítico y subcrítico.*



*Nota:* Tomado de Criterios de diseño de obras hidráulicas para la formulación de proyectos hidráulicos multisectoriales y de afianzamiento hídrico, p.130, 2010, ANA.

### 2.2.1.4 Erosión de canales asociado al flujo supercrítico en canales

El inconveniente más grande que presentan los flujos supercríticos en canales se da cuando las velocidades que circulan por el canal son tan grandes que lo erosionan. En razón a

esto, la Autoridad Nacional del Agua (ANA, 2010) menciona que el diseño del canal tiene que tener en cuenta las máximas velocidades que circulan por el canal, ya que de esta manera se puede acondicionar, para el caso de canales de concreto, las propiedades de resistencia del concreto.

**Tabla 1**

*Resistencia del concreto asociado al tirante y máximas velocidades*

Resistencia (kg/cm <sup>2</sup> )	Profundidad del tirante				
	0.50	1.00	3.00	5.00	10.00
50	9.60	10.60	12.30	13.00	14.10
75	11.20	12.40	14.30	15.20	16.40
100	12.70	13.80	16.00	17.00	18.30
150	14.00	15.60	18.00	19.10	20.60
200	15.60	17.30	20.00	21.20	22.90

*Nota:* Tomado de Criterios de diseño de obras hidráulicas para la formulación de proyectos hidráulicos multisectoriales y de afianzamiento hídrico, p.16, 2010, ANA.

## 2.3 Antecedentes del drenaje urbano en el país

### 2.3.1 Drenaje urbano en el periodo incaico (Machu Picchu)

Durante años el Perú ha sido reconocido como uno de los lugares turísticos más importantes del mundo, hace algunos años se otorgó a la ciudadela de Machu Picchu el título de una de las nuevas maravillas del mundo, con lo que la ciudadela situada en el departamento de Cusco (Perú) adquirió mayor notoriedad e hizo que muchos profesionales empezaran a posar sus miradas con fines culturales e investigativos.

Uno de estos profesionales fue el ingeniero civil especialista en hidráulica Kenneth Wrigth, el cual llegó al Perú luego de que su esposa Ruth Wrigth lo convenciera de iniciar una investigación referente a la ingeniería hidráulica desarrollada en el periodo de los Incas en la ciudadela de Machu Picchu. Wright concluyó que los habitantes de la época habían adquirido sólidos conocimientos de hidrología, drenaje, desagüe y cimentaciones en base a la

experiencia de muchos años de conocimiento que se pasaba de generación en generación y que la construcción de la ciudadela fue planeada de forma muy minuciosa alrededor de las obras hidráulicas y recursos naturales locales como el río Urubamba.

La ciudadela de Machu Picchu se encuentra ubicada entre dos fallas geográficas lo que permitía que las lluvias se acumularan y se filtraran hasta llegar a ella, al norte se puede encontrar una montaña que funciona como un manantial madre o principal que acumula el agua de las lluvias, Wright indica que los antiguos pobladores crearon un sistema recolector de agua que apoyaba a este manantial para que el agua almacenada sea dirigida mediante un canal principal de 750 m de largo con una inclinación de 3% a la ciudadela que se encontraba a una altura de 2458 m.s.n.m., los pobladores podían acceder al agua por medio de dieciséis surtidores ubicados en las paredes de la ciudadela que se alimentaban del agua que llegaba de dicho canal; también este canal pasaba por la zona agrícola, pero estudios posteriores demostraron que los pobladores no regaban los sembríos que usualmente eran de papa y maíz con el agua de dicho canal sino que bastaba con el agua de las lluvias.

Con respecto a las terrazas o andenes encontrados en Machu Picchu, Wright logró comprender que el propósito de estas estructuras creadas en las laderas de las montañas más importantes, no solo servían para la agricultura, sino que tenían el objetivo de salvaguardar la zona urbana del deslizamiento de tierra que podría ocurrir a consecuencia de las intensas precipitaciones de la zona. La tecnología que existe detrás de estas estructuras demuestra el gran conocimiento de cimentaciones que se tenía en esta época. Estas terrazas o andenes estaban compuestos por capas superpuestas que consistían en una capa de suelo firme de 1 m a 1.5 m de espesor que servía para el cultivo de papa y maíz, luego se podía encontrar una capa de suelo de grava o arena fina que permitía la infiltración del agua de lluvia y por último se encontraba una capa de grava media lo que permitía que el agua llegara al subsuelo, toda esta estructura estaba protegida por muros de contención de piedra. También se pudo notar

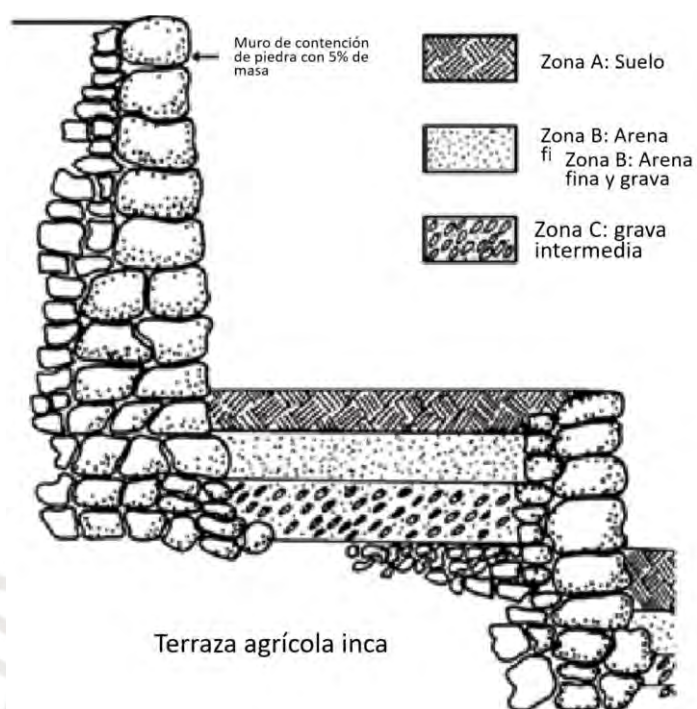
que estas terrazas o andenes contaban con una ligera inclinación lo que permitía que no haya inundaciones en esta zona y que el agua que no lograra infiltrar sea evacuada y cayera por gravedad hacia un canal secundario que se intercepta con el canal principal, como se puede ver todo un sistema de drenaje planificado y mejorado por la experiencia y conocimientos ancestrales. (Astete & Bastante, 2020)

### **Figura 12**

*Sistema de drenaje en Machu Picchu*



Nota: Se muestra, a la izquierda el canal de drenaje de los recintos más importantes, y a la derecha canal de intercepción de agua de lluvia. Tomado de *Machu Picchu Investigaciones Interdisciplinarias* (p. 350), por Astete F. Bustamante J, 2020, Ministerio de Cultura del Perú.

**Figura 13***Sistema de terrazas agrícolas en Machu Picchu*

*Nota:* Tomado de *Machu Picchu Investigaciones Interdisciplinarias* (p. 350), por Astete F. Bustamante J, 2020, Ministerio de Cultura del Perú.

**Figura 14***Sistema de andenerías en Machu Picchu*

*Nota:* Tomado de *Machu Picchu Investigaciones Interdisciplinarias* (p. 185), por Kauffmand, Federico, 2020, Ministerio de Cultura del Perú.

Finalmente, Wright pone en conocimiento que los antiguos pobladores no solo se preocupaban por el aspecto ingenieril y de seguridad, sino que todo esto estaba contemplado en una planificación estética y paisajística, sin duda alguna algo digno de reyes y de gobernantes superiores que en esa época estaban representados por los Incas. Wright, en una de sus conferencias comenta que la ingeniería Inca es un ejemplo claro de sostenibilidad ya que ellos siempre entendieron la importancia de beber agua pura, así como la importancia de controlar el desagüe de la superficie. Los ingenieros Incas diseñaron sus construcciones con el fin de prevalecer a través del tiempo con un mínimo de mantenimiento. (Astete & Bastante, 2020)

#### **2.4 Marco legal de la gestión de riesgos y la gestión actual del riesgo de inundaciones en el Perú**

El 31 de mayo del año 1970, ocurrió uno de los terremotos más devastadores en la historia del Perú. Este terremoto tuvo lugar en la provincia de Ancash con epicentro en la ciudad de Yungay, el cual cobró aproximadamente 70000 víctimas. (INEI et al., 2015) . Se dice que este fue uno de los más devastadores, no por el movimiento en sí ya que tuvo una magnitud de 7.8 Mw en la escala de Richter sino por el alud que se produjo después del terremoto y dejó enterrada a toda la ciudad. Este acontecimiento marcó un antes y un después en lo que respecta a la gestión del riesgo en el país ya que después de este suceso se pudo crear el Sistema de Defensa Civil (SINADECI) en 1972 durante la etapa del gobierno militar para que se aplicara en caso de que ocurriera otro evento como este, la institución encargada sería el Instituto Nacional de Defensa Civil (INDECI) creada en el mismo año por la misma ley. (OCHA-ONU, 2023)

Si bien el Perú esta propenso a sufrir sismos de grandes magnitudes, los desastres naturales más recurrentes son las inundaciones y los huaicos. Es importante por este motivo analizar el Fenómeno del Niño Costero que según los expertos ya no sería un evento

aleatorio, sino que ya se empezaría a entender un patrón de recurrencia. Debido a esto, el Perú se unió junto a otros países latinos pertenecientes al círculo de fuego para formar en 1974 el Estudio Regional del Fenómeno del Niño (ERFEN). En la actualidad, el país cuenta con un comité encargado del estudio de este fenómeno y sus consecuencias a nivel nacional mediante el Comité Multisectorial encargado del Estudio Nacional del Fenómeno del Niño (ENFEN) creado en 1977 conformado por múltiples instituciones como el ANA, DHN, INDECI, IMARPE, IGP, SENAMHI y el CENEPRED.

En el año 2011, el Congreso de la República aprobó la ley N°29664 la cual incentivaba la creación de programas que apoyen la gestión de reducción del riesgo como: el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres (SINAGERD); así como la Política Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres y el Plan Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres (PLANAGERD) sobre la base de una gestión prospectiva, correctiva y reactiva mediante la estimación de riesgos, prevención, reducción, preparación, respuesta, rehabilitación y reconstrucción. También se instaló el Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres (CENEPRED). (Fekete et al., 2017)

Finalmente, en el año 2017 ocurrió otro Fenómeno del Niño, el cual afectó al norte del Perú, por este motivo, se instauró la Autoridad de Reconstrucción con Cambios el cual está orientado a la reconstrucción de la infraestructura dañada por el Fenómeno del Niño de dicho año con un componente de prevención.

## **2.5 Introducción a los SuDS y otros conceptos de drenaje sostenible en el mundo**

Los diversos conceptos referentes a la gestión del drenaje urbano tienden a variar respecto de la localidad en la que se desarrollan, esto es importante de reconocer debido a que las terminologías empleadas en los distintos conceptos evolucionan gracias al trabajo de sus autores. Sin embargo, es importante mencionar que lo que se busca es presentar información que sea veraz y uniforme para no causar confusión y una mala interpretación de las personas

que empiecen a estudiar estos conceptos (Fletcher et al., 2015). A continuación, se verá algunos conceptos y terminologías comprendidas dentro de los drenajes sostenibles a nivel mundial, desarrollados en el trabajo académico recopilados por T. D. Fletcher (2015) donde se podrá ver que no todas las definiciones son iguales ya que algunas se centran en la calidad del agua, otras en la gestión y otras en las medidas de control, sin embargo, es importante reconocer que todas estas siguen la misma filosofía.

### **2.5.1 Water sensitive urban design (WSUD)**

El WSUD es una filosofía de trabajo que pretende mitigar los impactos hidrológicos generados por el creciente desarrollo urbano, existe también una preocupación por la protección de los espacios naturales. Este término se empezó a usar en Australia en el año 1990, en donde el Gobierno Australiano señaló algunos objetivos esenciales: Gestionar el balance hídrico, mantener o mejorar la calidad del agua superficial como subterránea, minimizar el uso del agua para consumo humano y hacer hincapié en la reutilización del agua pluvial para uso no potable (irrigación), mantenimiento del medio ambiente y espacios de recreación relacionados con el agua.(Fletcher et al., 2015)

En el caso de la gestión de aguas pluviales, el WSUD señala que tiene como objetivos: la protección y proliferación de los sistemas naturales de agua en las ciudades, integración de drenajes urbanos con el medio ambiente que apoye al paisajismo local, protección de la calidad del agua que se evacúa de las urbes, reducción de los caudales picos empleando métodos de retención natural y minimizando las áreas impermeables causadas por el crecimiento urbano, así como la disminución del costo de infraestructura para la evacuación de las aguas pluviales. (Joshi et al., 2021)

Actualmente en Australia existe un uso paralelo del término WSUD con Water Sensitive Cities, sin embargo, la principal diferencia entre estos términos se encuentra en que

el Water Sensitive Cities describe el destino o el objetivo, en cambio el WSUD escribe el proceso.

### **2.5.2 Best management practice (BMP)**

El término BMP comienza a usarse en el año 1950 en USA y su uso es más recurrente en esa zona y Canadá. Durante ese año el término comenzó a utilizarse en el ambiente de la agricultura para señalar aquellas prácticas las cuales cumplen con la definición de sostenibilidad que se tiene en la actualidad, la cual era generar el menor impacto en los recursos naturales para que las generaciones de esa época puedan abastecerse, pero también pensar en las generaciones futuras o venideras. (Ferrans et al., 2022)

El término BMP se relaciona con los conceptos de drenaje urbano en un primer momento con la gestión o manejo de las aguas residuales y el tratamiento de estas en plantas especializadas. Actualmente la EPA (Environmental Protection Agency) define los BMPs como las técnicas, procesos, actividades o estructuras que ayudan a disminuir la carga de contaminantes en la evacuación de aguas pluviales que podrían ser implementados individualmente o en conjunto para maximizar la eficiencia. En general, este término hace ilusión a las prácticas que tienen como objetivo lidiar con los problemas de la cantidad y calidad del agua procedente de las lluvias. (Vishwakarma & Joshi, 2023)

### **2.5.3 Low impact development (lid)**

El término LID tiene un uso más recurrente en Estados Unidos y Nueva Zelanda, en español significa ‘Técnicas de Desarrollo de Bajo Impacto’. La EPA (Environmental Protection Agency) describe este concepto como estrategias de diseño para recrear un paisaje hidrológico equivalente al natural, es decir, lo que se busca es obtener un enfoque que minimice el costo de la gestión de evacuación de aguas pluviales manteniendo un enfoque natural. El primer manual municipal fue creado en 1997 en el Condado del Prince George,

USA con el nombre de Low Impact Development Design Manual (Manual de Diseño Aplicando Técnicas de Desarrollo de Bajo Impacto).

Estos conceptos tienen a tener pequeñas variaciones en ciertos lugares como en Nueva Zelanda, donde el enfoque que se tiene radica en la disminución de contaminación y sedimentos más que en la gestión del régimen del flujo de las aguas pluviales.

Lo que sí es necesario reconocer es que el término LID implica un impacto en la naturaleza mucho más bajo que las técnicas convencionales, además este término no contiene la palabra ‘agua’, por lo que es fácil comprometer a otras disciplinas en su consideración y ejecución como la arquitectura, administración, economía y las ciencias sociales. (Fletcher et al., 2015)

#### **2.5.4 Green infraestructura (GI)**

Este término comenzó a utilizarse en Estados Unidos en el año 1990, en español significa ‘Infraestructura Verde’, es un término que va más allá del drenaje urbano y está más relacionado con el paisajismo y el aspecto ecológico. Se maximiza el uso de espacios verdes y sus beneficios con el ecosistema.

Las técnicas más comunes de GI aplicadas en el drenaje urbano son: Techos verdes, plantación de árboles, jardines para la lluvia y pavimentos permeables. La mayor diferencia con los drenajes convencionales es que estos utilizan redes de tuberías, en cambio en los GI se utiliza la vegetación y los suelos para la gestión del agua pluvial, imitando procesos naturales del agua como la infiltración, filtración, evapotranspiración dándole un uso adicional al agua proveniente de las lluvias.

En la actualidad, la mayoría de la literatura que estudia la gestión del drenaje urbano sostenible tiende a poner el término GI como un sinónimo del término LID.

### **2.5.5 Integrated urban water management (IUWM)**

Según Biswas, este término indicaba en sus inicios un concepto más amplio que el de drenaje urbano ya que se intentaba tener una gestión integrada de todo el ciclo natural del agua dentro de una cuenca (área de captación natural de agua proveniente e las precipitaciones).

El término IUWM comenzó a usarse en 1990 cuando se necesitaba hablar en ciertos papers referente al drenaje urbano sostenible. Aparece recién en el 2004 en el Urban Drainage Multilingual Glossary.

El término IUWM involucra la gestión del suministro del agua, agua subterránea, aguas residuales y aguas pluviales en el contexto urbano. Tiene objetivos claros de diseño como: la consideración del ciclo natural del agua en la gestión del agua pluvial en la superficie y del agua subterránea mediante un sistema integrado, tener siempre en consideración el contexto local (medio ambiental, económico, social, cultural, etc.) y tener siempre en mente el tema de sostenibilidad que involucre el desarrollo de dichas técnicas sin perjudicar el abastecimiento de recursos locales naturales para su uso en un futuro a corto y largo plazo.

El IUWM está más relacionado con los términos WSUD y LID, ya que estas ideas van mucho más allá de la solo la gestión del drenaje urbano.

### **2.5.6 Alternative techniques (ATs)**

Las ATs o ‘Técnicas Alternativas’ en español, comenzaron a utilizarse y llamarse con este nombre en Francia en los años 80s cuando se empezó a dar una expansión urbana de la ciudad de París, pero se quería tener un enfoque medio ambiental y sostenible.

‘Alternative Techniques’ o también llamadas ‘Compensatory Techniques (Técnicas compensatorias)’ ya que se quería tratar de solucionar o compensar los posibles daños ocasionados por la expansión desproporcionada de las urbes de aquella época, se debe tener

en cuenta siempre los daños al medio ambiente que se generan al quitarle el espacio natural que estas poseen y el efecto que generan a su entorno.

El término ‘alternative’ (alternativo) se refiere al cambio de paradigma con el uso de técnicas aplicadas al drenaje urbano, que hasta en ese momento solo se hacía uso de técnicas ‘convencionales’ de drenaje urbano. Este término tiene una mayor relación en concepto con el término LID ya que involucra no solamente a la gestión del drenaje urbano sino a otras disciplinas como paisajismo, arquitectura, etc. Este término también es usado localmente en el país de Chile; a pesar de todo lo visto, el término ATs está perdiendo vigencia en su lugar de origen ya que se prefiere usar términos como los IUWM o SuDS.

## **2.5.7 Sustainable drainage systems (SuDS)**

### **2.5.7.1 Breve reseña histórica**

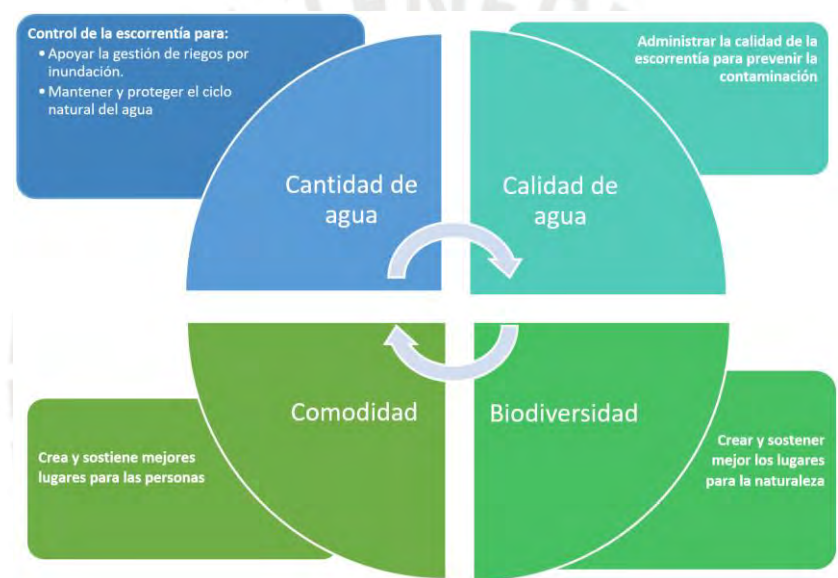
El término SuDS fue usado por primera vez por CIRIA (entidad privada independiente sin fines de lucro) en el Reino Unido a principios de los 2000s. Algunas entidades omiten la palabra ‘Urban’ quedando solo ‘Sustainable Drainage Systems (SuDS)’, pero en esencia tienen la misma filosofía de trabajo y de diseño. En algunos países como España se utiliza el término ‘Técnicas de Drenaje Urbano Sostenible (TUDS)’, en el resto de Hispanoamérica se utiliza el término ‘Mejores Prácticas de Control (MPC)’ y en Chile se puede ver el nombre de ‘Técnicas Alternativas (TAs)’ para representar a los SuDS. Actualmente se cuenta con un manual oficial creado por la misma entidad: The SuDS Manual (Kellagher et al., 2015) el cual se va actualizando con el tiempo y del cual se pasará a revisar algunos aspectos importantes. Cabe reconocer que gran parte de este trabajo académico se realizará mediante la filosofía, técnicas de diseño, beneficios y mantenimiento impartido en dicho manual oficial.

### 2.5.7.2 Filosofía SuDS

La filosofía de los SuDS trata acerca de maximizar los beneficios y minimizar los impactos generados por el agua de las lluvias en los entornos locales, se encarga siempre de gestionar el agua proveniente de las lluvias teniendo en consideración su ciclo natural, así como el elemento estético y paisajístico generando el mínimo impacto en el medio ambiente con una mira hacia el futuro añadiendo el concepto de sostenibilidad en todo su diseño.

#### Figura 15

##### Filosofía de los SuDS



Nota: Tomado de *The SuDS Manual* (p. 06), por Kellager et al., 2015, CIRIA.

### 2.5.7.3 Beneficios

Los SuDS contienen principalmente sus beneficios en cuatro grandes áreas de estudio: Cantidad de agua, Calidad del agua, Comodidad y La Biodiversidad.

#### *Cantidad de agua*

Apoyar la gestión del riesgo de inundaciones.

Mantener el ciclo natural del agua de lluvia

Controlar el flujo continuo natural de recursos hídricos locales como lagos, ríos y otras corrientes.

### *Calidad del agua*

Gestión de los residuos que trae el agua de escorrentía y la correcta disposición de estos.

Controlar la contaminación que se podría generar en los flujos de aguas subterráneas.

### *Comodidad*

Generar un mejor entorno para el desarrollo de las personas.

Crear espacios atractivos en donde las personas tengan ganas de vivir, trabajar y realizar actividades que fomenten el desarrollo de comunidades y del individuo.

Generar un vínculo substancial entre el entorno natural y las comunidades locales.

Generar urbes que sean resilientes al cambio climático

### *Biodiversidad*

Generar un mejor entorno para el medio ambiente y su proliferación natural.

Asociación de ecosistemas mediante la vinculación de diversos hábitats naturales.

#### **2.5.7.4 Drenajes convencionales vs SuDS**

**Tabla 2**

*Filosofía de los SuDS, comparación entre los SuDS y drenajes convencionales*

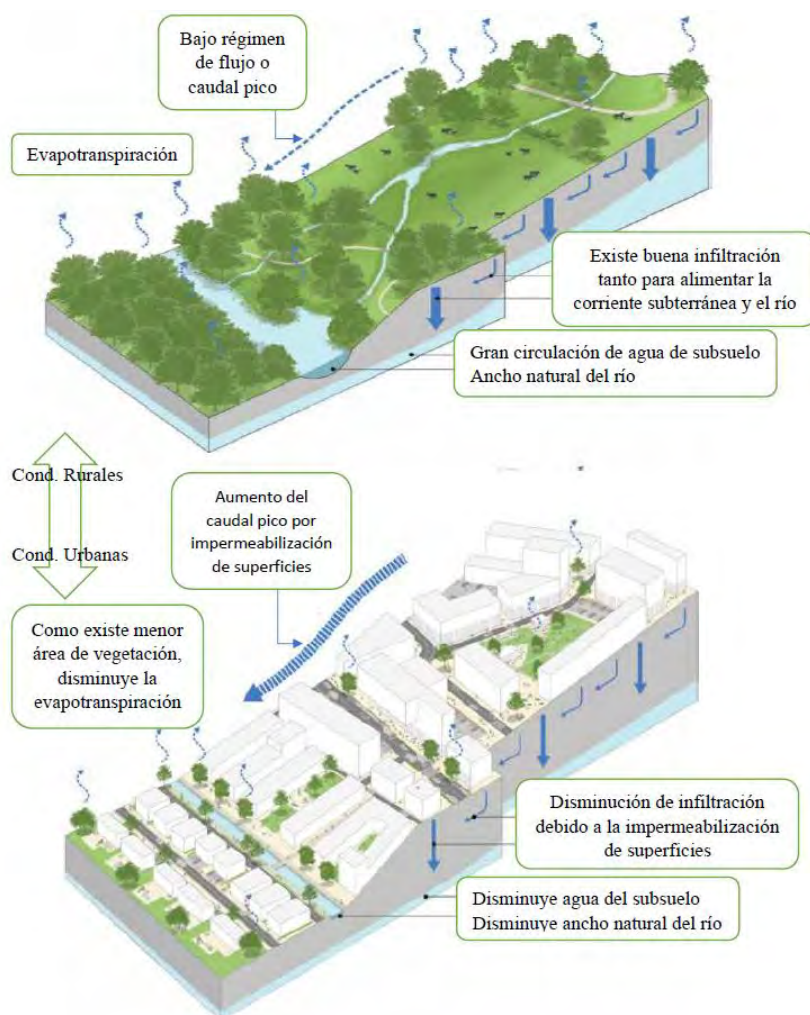
	<b>Drenajes convencionales</b>	<b>SuDS</b>
Preocupación por arrastre de contaminantes	Muy poco	Si
Caudales pico	Altos	Bajos
Adaptación al cambio climático	No	Si
Mejora del entorno	No	Si, mejoramiento paisajístico y estético
Contemplación del ciclo natural del agua	No	Si
Costos	Altos	Costos altos por falta de capacitación en mantenimiento

Nota: Tomado de *Drenaje Urbano Sostenible (p. 10)*, por Rodríguez S., 2017, 3er Congreso de Construcción Sostenible.

### 2.5.7.5 Impacto de las ciudades al entorno natural

**Figura 16**

*Efecto de las ciudades en los procesos naturales del agua de lluvia*



Nota: Tomado de *The SuDS Manual* (p. 22), por Kellager et al., 2015, CIRIA.

## 2.6 Técnicas aplicadas en los SuDS

### 2.6.1 Colector de agua de lluvia

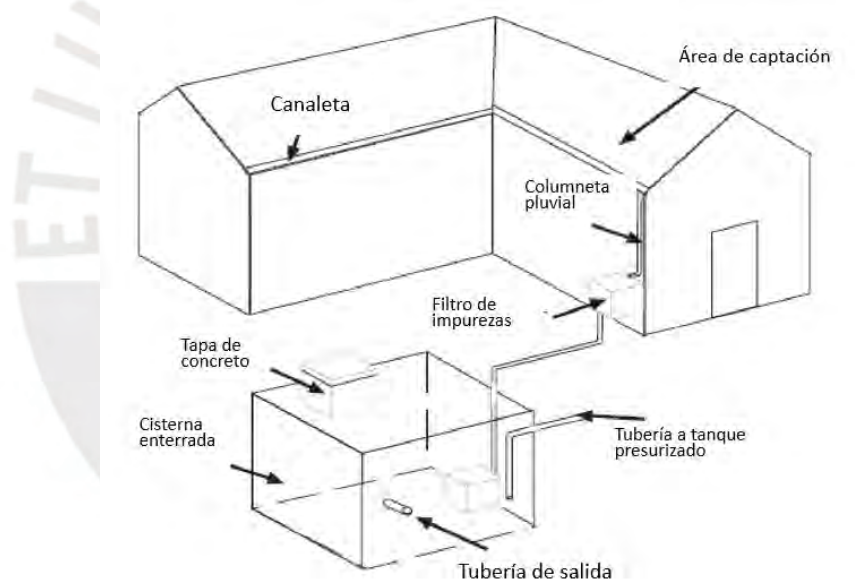
Esta técnica de drenaje sostenible intercepta, transporta y almacena el agua de lluvia para usarlo en el futuro. Esta práctica tiene como beneficios la reducción de la escorrentía de las aguas pluviales y conserva el agua potable disponible en el hogar; además, al ser usada en

irrigación, se ayuda a mantener el equilibrio hídrico, pues el agua usada es evapotranspirada por las plantas y/o infiltrada por el suelo.

El agua recolectada puede ser usado tanto dentro de una vivienda u edificio o fuera de ella, claro que con un mínimo tratamiento previo del agua. Dentro de una vivienda o edificio se puede usar para descargar inodoros y urinarios; y fuera de las viviendas se puede usar para riego o lavado de vehículos. Con esto se reduciría un 55% el consumo de agua potable (Reid Homes, 2007). Debido a estos usos, hay dos tipos de diseño, algunos sistemas están diseñados para usos internos y externos, u otros sistemas solo para usos externos.

### Figura 17

*Diseño básico para sistema de recolección de agua de lluvias*



Nota: Tomado de *Low impact development stormwater management planning and design guide* (p. 4-9), por Credit Valley Conservation, 2010, CVC.

Este sistema recoge el agua en una superficie de captación, la más común es un techo, luego la transporta a un tanque de almacenamiento; la capacidad de este tanque depende del uso que se le quiere dar, por ejemplo, para usos en residenciales se suelen usar barriles de 190a 400 litros de capacidad, para usos industriales o comerciales se suelen usar cisternas prefabricadas de 750 a 40000 litros de capacidad.

### 2.6.2 Techos verdes

Este sistema consiste en instalar una capa delgada de vegetación sobre diferentes áreas superficiales (techo plano o inclinado, cubiertas y terrazas). Los techos verdes también son conocidos como “techos vivos” o “jardines de azotea”, pues aportan un componente paisajístico al inmueble, también reducen los efectos de las islas de calor urbano y mejoran la eficiencia energética, es por ello por lo que este sistema es una de las más populares.

El sistema funciona de la siguiente manera, el agua de lluvia ingresa de forma directa al área del techo verde, allí se detiene temporalmente, pues las plantas tienen esa propiedad, el agua retenida es aprovechada por el área verde y el exceso ingresa a los desagües y se transporta en el sistema de drenaje del edificio.

#### Figura 18

*Techos verdes instalados en la ciudad*



Nota: Tomado de *Low impact development stormwater management planning and design guide* (p. 4-23), por Credit Valley Conservation, 2010, CVC.

Es importante mencionar algunas restricciones que se tiene este sistema:

- Solo se puede techos verdes en pendientes menores a 10%

- El agua que capta este sistema es directamente de la lluvia, no están diseñados para recibir escorrentías desviadas de otra fuente.
- Se debe tener en cuenta las cargas estructurales adicionales que se tendrán (área verde, tierra, agua, personas). La mayoría de las normas de diseño estructural en los países no contemplan estas cargas.

### 2.6.3 Desconexión de bajante de techo

La desconexión de bajante de techo consiste en dirigir el flujo del agua de la bajante del techo hacia un área permeable, esto para no verter directamente el agua de escorrentía al alcantarillado pluvial.

#### Figura 19

*Ejemplos del sistema de desconexión de bajante de techo*



Nota: Tomado de *Low impact development stormwater management planning and design guide* (p. 4-38), por Credit Valley Conservation, 2010, CVC.

Se debe tener en cuenta las siguientes precauciones:

- Debe haber una distancia de 3 metros entre los cimientos del edificio los lugares de descarga de las bajantes de techo
- Se debe de evitar el tránsito pesado en la zona permeable donde se dirigen las bajantes de techo, pues la compactación del terreno disminuye considerablemente la permeabilidad de los suelos, se recomienda plantar vegetación en dichas zonas.

- Se debe evaluar si el área permeable tiene la suficiente capacidad para que no exista estancamiento del agua, de caso contrario se tendría que hacer mantenimiento a la zona.

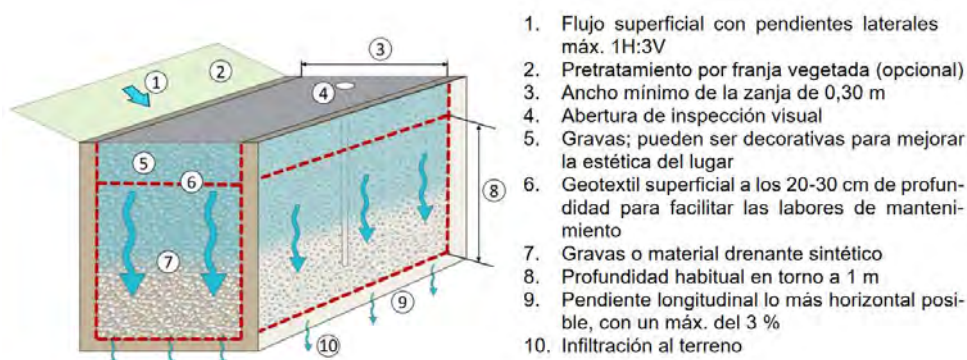
#### 2.6.4 Soakaways, zanjas y cámaras de infiltración

Estos sistemas son usados solo en sitios adecuados para las prácticas de infiltración subterránea de aguas pluviales. Estos sistemas funcionan básicamente con los siguientes principios:

Interceptan la escorrentía de lluvia de las áreas contigua, almacenan temporalmente de manera superficial, y favorecen infiltración al terreno. Para almacenar temporalmente el agua de escorrentía se hace una excavación en el terreno, luego se rellena con material drenante (granular o sintético).

#### Figura 20

*Esquema conceptual de soakaways, zanjas y cámaras de infiltración*



Nota: Tomado de *Guía básica de diseño de sistemas urbanos de drenaje sostenible para el término Municipal de Castelló de la Plana* (p. 23), por Perales et. al, 2019, Green Blue Management.

Existe una variedad de opciones de diseño de instalación a considerar, tales como soakaways, zanjas de infiltración y cámaras de infiltración.

##### 2.6.4.1 Los Soakaways o sumideros

Son unas cámaras rectangulares o cilíndricas cubiertas de tela de geotextil y rellanas de material granular limpio u otro material con huecos, estas cámaras reciben la escorrentía

por una tubería perforada, la cual permite que se infiltre agua en el suelo. A diferencia de las zanjas de infiltración, los soakaways pueden ubicarse en un sitio puntual, es así que, en cuanto al espacio disponible, no existen muchas limitaciones; es por ello que este sistema es muy usado en zonas altamente urbanizadas. Además, es importante instalar estructuras de pretratamiento antes del ingreso del agua a esta estructura, y proponer un adecuado plan de mantenimiento y monitoreo.

#### ***2.6.4.2 Las zanjas de infiltración***

Son estructuras rectangulares, cavadas de manera lineal, son forradas con tela de geotextil y rellenas con piedra granular limpia o cualquier otro material permeable con huecos. Se utiliza, mayormente, en sitios donde el espacio de infiltración se limita a franjas estrechas de tierra entre propiedades o edificios.

#### ***2.6.4.3 Las cámaras de infiltración***

Son otra variación de los sumideros de infiltración, en estas estructuras, se crean grandes espacios vacíos para el almacenamiento temporal de la escorrentía de lluvia para luego infiltrarse en el suelo. Debido al gran volumen vacío generado, se adaptan en lugares donde se desea que la instalación tenga poca o ninguna huella superficial.

### **Figura 21**

*Izquierda (soakaways), centro (zanja de infiltración), derecha (cámara de infiltración)*



Nota: Tomado de *Low impact development stormwater management planning and design guide* (p. 4-38), por Credit Valley Conservation, 2010, CVC.

### 2.6.5 Bio-retención

Este sistema, almacena, trata e infiltra temporalmente el agua de escorrentía. El lecho filtrante, es el principal componente de este sistema, el cual es una mezcla de arena, finos y material orgánico. A menudo, el pretratamiento, un filtro de vegetación o un diafragma de piedra, preceden a la bio-retención, esto para eliminar partículas que obstruirían el lecho del filtro. Es decir, este sistema cuenta con cobertura vegetal, el cual hará que el volumen de escorrentía almacenado experimente procesos biológicos, además de procesos físicos y químicos, esto hace que el sistema se desempeñe adecuadamente como un sistema de remoción de contaminantes. Sin embargo, el crecimiento de la vegetación puede comprometer a la estructura con el tiempo, es por ellos que se debe elaborar un plan de mantenimiento y monitoreo.

El ingreso de la escorrentía es de manera directa o por medio de estructuras anexas. Además, el volumen de agua sobrante que no fue absorbido por la vegetación o no fue infiltrado por el suelo, es retirado por medio de tuberías de drenaje.

#### Figura 22

*Ejemplo del sistema de Bio-retención*



Nota: Tomado de *Low impact development stormwater management planning and design guide* (p. 4-66), por Credit Valley Conservation, 2010, CVC.

A continuación, se mencionan algunas precauciones que pueden abordarse durante el diseño:

Los contaminantes que pueden llegar al subsuelo, debido a la infiltración, especialmente en las carreteras y áreas de estacionamiento, pues en estas zonas se suele aplicar cloruro y sodio de las sales de deshielo, además se sabe que, las sales de deshielo aumentan la movilidad de ciertos metales pesados en el suelo. Es por ello que se recomienda que este diseño no reciba escorrentía de áreas de alto tráfico donde se aplican grandes cantidades de sales de deshielo.

El tráfico de peatones; los diseñadores deben considerar métodos para evitar el tránsito peatonal, como, por ejemplo, la colocación de arbustos, barandas protectoras, etc.

#### **2.6.6 Tiras de filtro con vegetación**

Este sistema también es conocido como tiras de filtro con césped y tiras de amortiguación. Es un área de vegetación densa que tiene como función atenuar y disminuir la velocidad del agua de escorrentía debido a la pendiente suave que se le coloca, permite también filtrar los elementos sólidos suspendidos, e infiltrar el agua de escorrentía a los suelos subyacentes. La vegetación que se puede utilizar es una gran variedad de árboles, arbustos y plantas nativas, estos agregan un valor estético además de mejorar la calidad del agua infiltrada, pues este sistema puede proporcionar la disminución relativa de los contaminantes.

Es recomendable usar este sistema como una práctica de pretratamiento para otros sistemas de drenaje sostenible. Además, si existiera presencia de nieve en la zona de alteración, se debe plantar vegetación que tenga tolerancia a la sal y evitar la presencia de madera.

## Figura 23

*Ejemplo de las tiras de filtro con vegetación*



Nota: Tomado de *Low impact development stormwater management planning and design guide* (p. 4-98), por Credit Valley Conservation, 2010, CVC.

Para el diseño, se debe tomar en cuentas las siguientes precauciones:

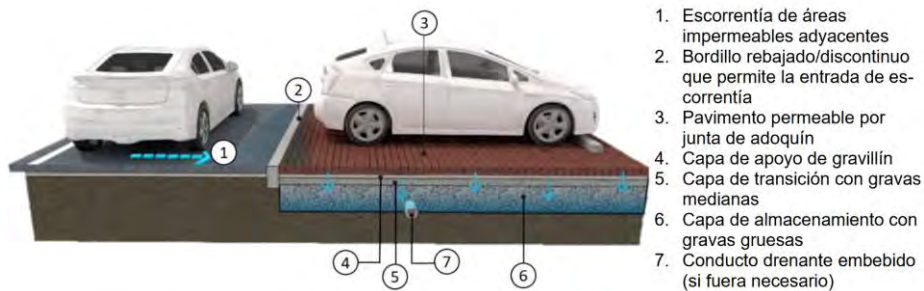
- Al igual que los sistemas de bio-retención, se debe tener cuidado con el cloruro y el sodio de las sales de deshielo aplicadas a las carreteras y áreas de estacionamiento, pues de lo contrario se contaminaría los subsuelos.
- La erosión se evita con las pendientes suaves que se le dan a este sistema, además se recomienda usar separadores.
- El agua estancada puede ocasionar la aparición de mosquitos, si esto ocurre, se debe evaluar revegetar el área.

### 2.6.7 Pavimento permeable

Este sistema permite el tránsito de vehículos y/o peatones, también, la infiltración de la escorrentía hacia las capas inferiores. El pavimento permeable es una alternativa para reemplazar al pavimento impermeable tradicional, los materiales más usados son el concreto y el asfalto. Este sistema permite el drenaje del agua pluvial hacia el suelo natural de la zona, para esto, el agua se almacena temporalmente en la subbase, luego el agua se infiltra al terreno o se descarga aguas abajo mediante drenes (controladamente).

## Figura 24

### Esquema conceptual de pavimento permeable



Nota: Tomado de *Guía básica de diseño de sistemas urbanos de drenaje sostenible para el término Municipal de Castelló de la Plana* (p. 31), por Perales et. al, 2019, Green Blue Management.

Los pavimentos permeables se pueden usar para carreteras de bajo tráfico, estacionamientos, entradas de vehículos, plazas peatonales y pasillos. A continuación, se mencionan algunos tipos de pavimento permeable.

- Asfalto permeable
- Adoquines de concreto
- Concreto permeable
- Rejillas de plástico o concretos llenados con grava.

## Figura 25

### Esquema conceptual de pavimento permeable



Nota: Tomado de *Low impact development stormwater management planning and design guide* (p. 4-98), por Credit Valley Conservation, 2010, CVC.

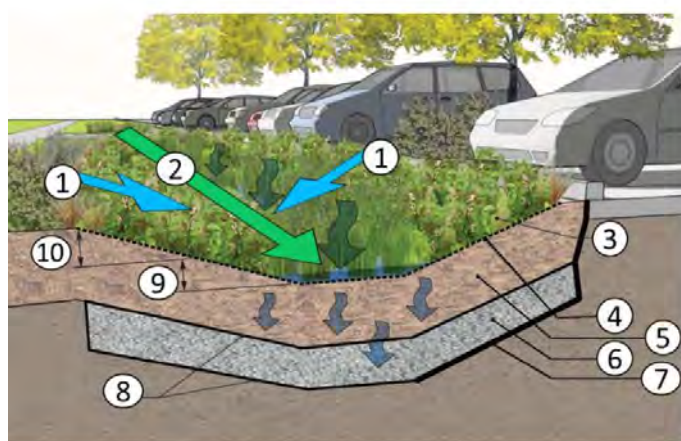
### 2.6.8 Canales de césped mejorado

Este sistema también es conocido como canales de hierba mejorados. Los canales de césped mejorado son canales abiertos llenos de vegetación, los cuales sirven para atenuar la velocidad del tránsito del agua de escorrentía. Este sistema es una estructura lineal ancha y de poca profundidad, como se mencionó antes, está cubierta de vegetación, que además de reducir la velocidad de la escorrentía de lluvia, permite captar, filtrar, y cuando las condiciones del terreno lo permitan, infiltrar la escorrentía.

Debido a la vegetación existente, hay una mayor eliminación de contaminantes a través de la sedimentación, la filtración, la evapotranspiración y la infiltración al terreno. Para aumentar la detención e infiltración, como la velocidad de la escorrentía, se puede colocar barreras transversales que favorezcan el almacenamiento.

**Figura 26**

*Esquema conceptual de canales de césped permeable*



1. Entrada lateral de escorrentía
2. Pendiente longitudinal 0,5 - 5 %
3. Altura de vegetación en torno a 15 cm, para favorecer la sedimentación.
4. Pendiente lateral máxima 1V:3H y, cuando sea posible, 1V:4H.
5. Medio filtrante
6. Capa drenante (opcional)
7. Geomembrana en el lado de la calzada para su protección (opcional)
8. Geotextil (opcional)
9. Altura máxima de agua en eventos frecuentes: 2/3 la altura de la vegetación para garantizar el tratamiento de la escorrentía
10. Resguardo

Nota: Tomado de *Guía básica de diseño de sistemas urbanos de drenaje sostenible para el término Municipal de Castelló de la Plana* (p. 43), por Perales et. al, 2019, Green Blue Management.

A continuación, se mencionan algunos beneficios de este sistema:

No representan un riesgo importante para la seguridad, pues está a poca profundidad. Es económica efectiva y sencilla para trasladar la escorrentía de lluvia hacia otro SuDS, y, mejora la estética de la zona

### Figura 27

*Esquema conceptual de canales de césped permeable*



Nota: Tomado de *Low impact development stormwater management planning and design guide* (p. 4-138), por Credit Valley Conservation, 2010, CVC.

#### 2.6.9 Canales para el secado

Este sistema es similar en diseño a los surcos de césped mejorado, es decir la geometría de superficie, pendiente, presas de retención y dispositivos de pretratamiento. En términos del diseño del lecho de medios filtrantes, es similar al sistema de bio-retención.

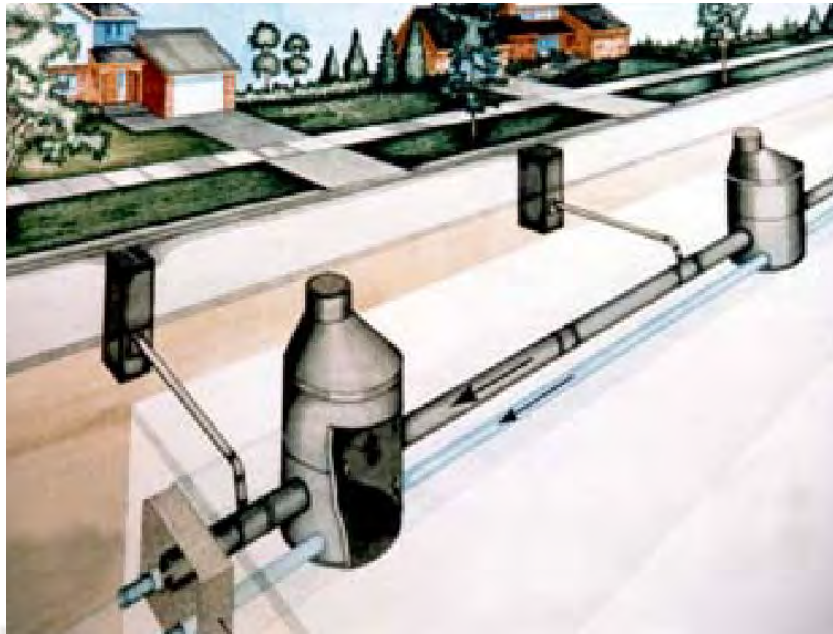
Los canales para el secado son canales diseñados para transmitir, tratar u atenuar la escorrentía de aguas pluviales, al igual que los surcos de césped mejorado, la vegetación en la superficie del plano ralentiza el agua de escorrentía, permitiendo así, la sedimentación, la filtración, la evapotranspiración y la infiltración en el suelo de la zona.

**Figura 28***Sistema de canales para el secado*

Nota: Tomado de *Low impact development stormwater management planning and design guide* (p. 4-149), por Credit Valley Conservation, 2010, CVC.

#### **2.6.10 Sistema de tubería perforada**

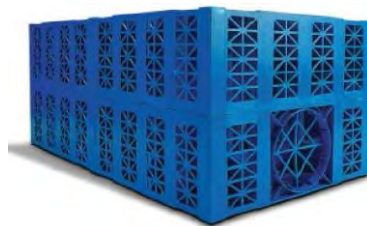
Este sistema consta de tuberías perforadas que se instalan en capas de piedras granulares con una pendiente suave y están forradas con telas de geotextil que permite la infiltración de la escorrentía a la capa de grava y suelo natural. Este sistema puede ser usado en lugar del alcantarillado tradicional para escorrentía o agua de lluvia, donde la topografía y el nivel freático sean los adecuados. Es una buena opción cuando se requiera trasladar el agua que se podría almacenar en los techos de las viviendas debido a las lluvias intensas, se pueden usar también en las veredas, estacionamientos y autopistas con poco tránsito. Existen variaciones donde se pueden encontrar sumideros que permitan la infiltración del agua de escorrentía al terreno natural de la zona de alteración.

**Figura 29***Sistema de tubería perforada*

Nota: Tomado de *Low impact development stormwater management planning and design guide* (p. 4-149), por Credit Valley Conservation, 2010, CVC.

### **2.6.11 Tanque de almacenamiento pluvial**

Este sistema permite el almacenamiento de agua en dispositivos modulares (PAVCO, 2018) en puntos donde se disponga de área libre con caudales de bajas velocidades, de manera que parte del agua circulante por el drenaje puede ser almacenado, para su posterior uso y/o descarga. (Palla & Gnecco, 2015)

**Figura 30***Sistema de tanque de almacenamiento AQUACEL*

Nota: Tomado de *Sistemas de Drenaje Urbano Sostenible* (p. 7), por PAVCO, 2018.

## 2.7 Valores típicos para diseño de SuDS

### 2.7.1 Techos verdes

Los valores típicos para el diseño de techos verdes según el Manual de Referencia del SWMM (Rossman & Huber, 2016) son los siguientes:

**Tabla 3**

*Valores típicos para diseño de techos verdes en SWMM*

<b>Parámetro</b>	<b>Rango</b>
Máxima altura libre (pulgadas)	0-3
Fracción de vacíos en la superficie	0.8-1.0
Espesor de capa de suelo (pulgadas)	2-6
Parámetros de capa de suelo:	
Porosidad	0.45-0.6
Capacidad de campo	0.30-0.50
Punto de marchitez	0.05-0.20
Disponibilidad de agua	0.25-0.30
Conductividad hidráulica (pulgadas/hora)	40-140
Coeficiente de succión frontal	2-4
Parámetro de percolación	30-55
Espesor de capa de drenaje (pulgadas)	0.5-2.0
Fracción de vacíos de capa de drenaje	0.20-0.40
Rugosidad de capa de drenaje	0.01-0.03
Relación de captura de agua	0

*Nota:* Tomado de *Storm Water Management Model Reference Manual Volume III – Water Quality*, p.128, 2016, Rossman & Huber.

### 2.7.2 Jardines pluviales y celdas de bio-retención

Los valores típicos para el diseño de techos verdes según el Manual de Referencia del SWMM (Rossman & Huber, 2016) son los siguientes:

**Tabla 4**

*Valores típicos para diseño de jardines pluviales y celdas de bioretención en SWMM*

<b>Parámetro</b>	<b>Rango</b>
Máxima altura libre (pulgadas)	6-12
Fracción de vacíos en la superficie	0.8-1.0
Espesor de capa de suelo (pulgadas)	24-48
Parámetros de capa de suelo:	
Porosidad	0.45-0.60
Capacidad de campo	0.15-0.25
Punto de marchitez	0.05-0.15
Disponibilidad de agua	0.25-0.30
Conductividad hidráulica (pulgadas/hora)	2.0-5.0
Coeficiente de succión frontal	2-4
Parámetro de percolación	30-55
Espesor de capa de drenaje (pulgadas)	6-360
Fracción de vacíos de capa de drenaje	0.20-0.40
Relación de captura de agua	5-15

*Nota:* Tomado de *Storm Water Management Model Reference Manual Volume III – Water Quality*, p.127, 2016, Rossman & Huber.

### **2.7.3 Pavimento permeable**

Los valores típicos para el diseño de pavimento permeable corresponden a valores de diseño vial principalmente, sin embargo, las propiedades del pavimento permeables a usarse deben corresponder a las especificaciones técnicas del material. En ese sentido, los valores tomados para determinar las propiedades del pavimento permeable, así como los valores típicos de diseño, son mostrados a continuación:

**Tabla 5**

*Valores típicos para diseño de jardines pluviales y celdas de bioretención en SWMM*

<b>Parámetro</b>	<b>Rango</b>
Almacenamiento de la superficie	0-0.1
Fracción de vacíos en la superficie	0.8-1.0
Espesor de capa de pavimento (pulgadas)	3-8
Parámetros del pavimento <sup>(*)</sup>	
Porosidad <sup>(*)</sup>	0.10
Conductividad hidráulica <sup>(*)</sup> (mm/hora)	7200
Fracción de superficie abierta <sup>(*)</sup>	0
Parámetros de la subbase	
Espesor (pulgadas)	8-12
Porosidad	0.25-0.35
Capacidad de campo	0.15-0.25
Punto de marchitez	0.05-0.10
Conductividad hidráulica (pulgadas/hora)	5-30
Parámetro de percolación	30-55
Espesor de capa de almacenamiento (pulgadas)	6-36
Fracción de vacíos de capa de almacenamiento	0.2-0.4
Ratio de captura de agua	0-5

*Nota:* Tomado de *Storm Water Management Model Reference Manual Volume III – Water Quality*, p.127, 2016, Rossman & Huber. (\*) Tomado de *Diseño de pavimento rígido permeable para la evacuación de aguas pluviales según la Norma ACI522R-10*, p. 110, 2018, por Bautista, A.

#### **2.7.4 Tanques de almacenamiento pluvial**

Los tanques de almacenamiento pluvial estiman los valores de su volumen según el área y el caudal de aporte en el área en referencia. El valor típico para el coeficiente de exponente de flujo es igual a 0.5. (Palla & Gnecco, 2015).

### **3 Métodos y datos**

#### **3.1 Enfoque de la investigación**

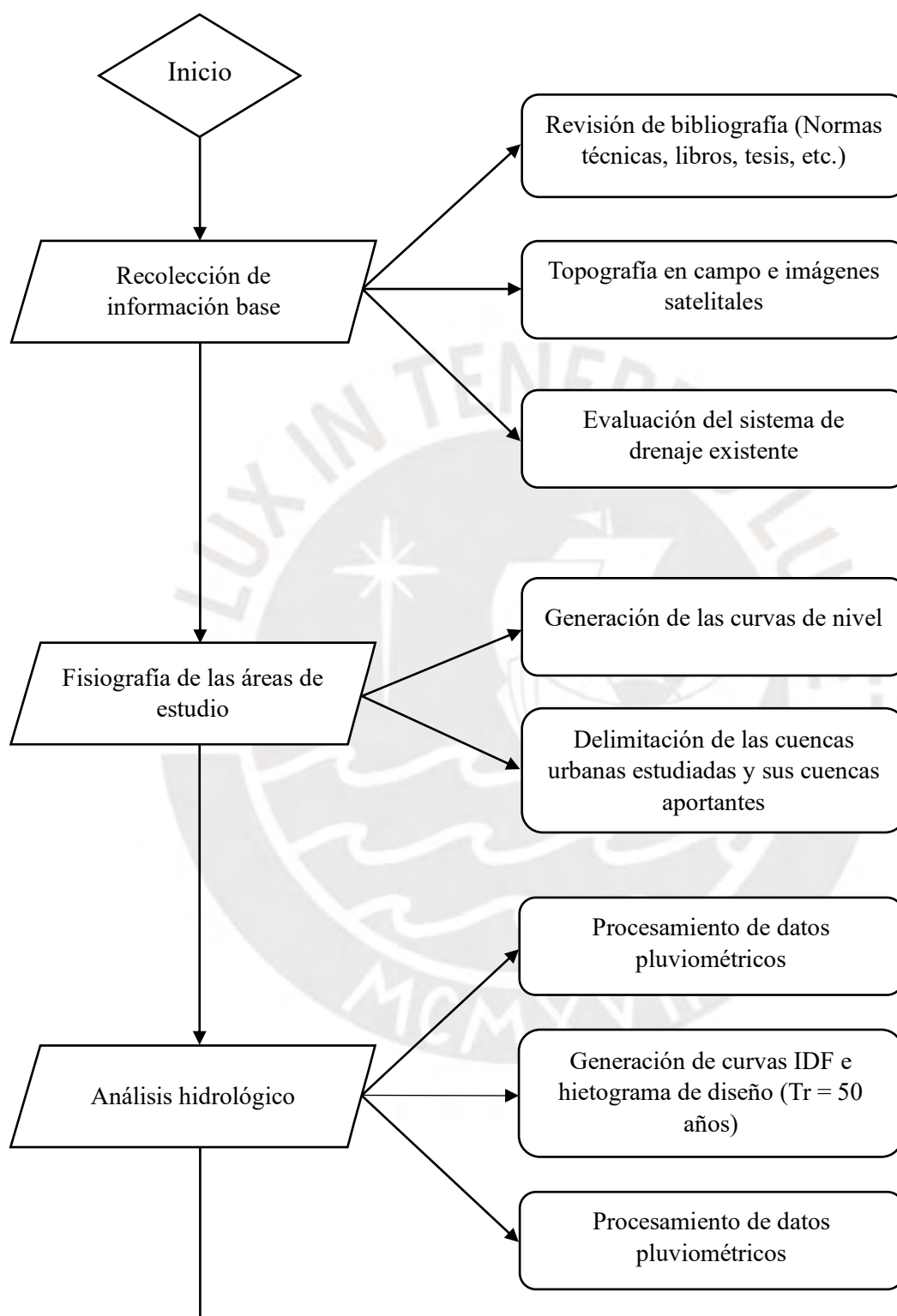
La presente investigación se enfoca en un análisis cuantitativo, porque en función a la información de ingeniería y bibliografía pertinente tiene como objetivo describir y determinar cuáles son los SuDS de mayor provecho para las áreas de estudio dentro del distrito y provincia de Huamanga, región Ayacucho.

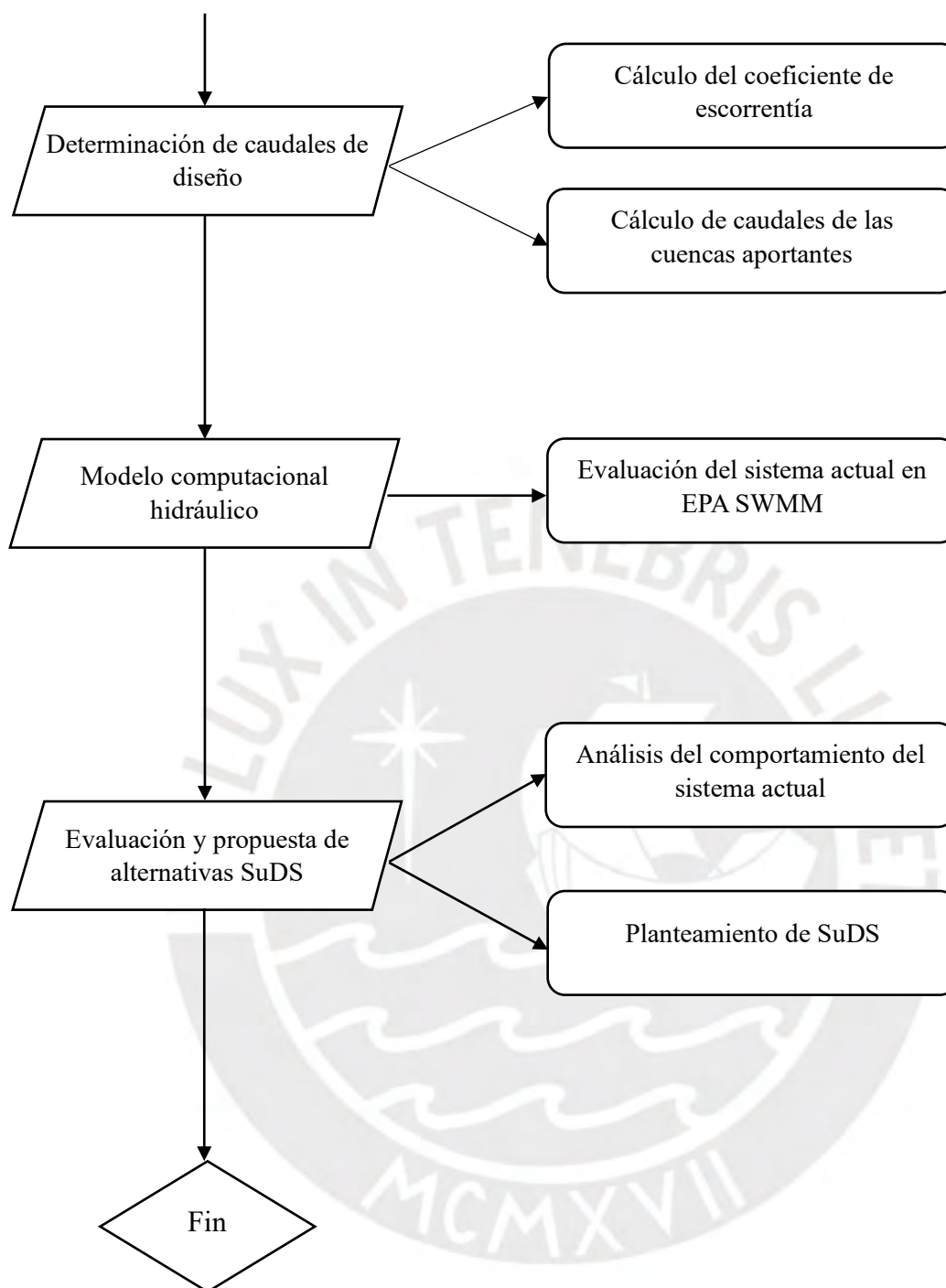
Como parte del diagnóstico técnico, se realizó una revisión general del sistema actual de drenaje pluvial en las zonas intervenidas. Si bien no se cuenta con planos detallados ni información completa del sistema subterráneo, se identificaron elementos como canaletas, captadores puntuales y tramos de tuberías en mal estado o con capacidad reducida. Asimismo, se detectaron posibles interferencias físicas con redes de agua, alcantarillado, energía y telecomunicaciones, especialmente en la zona histórica.

Estos hallazgos fueron considerados al definir la ubicación de las técnicas SUDS, priorizando soluciones de tipo superficial y con mínima excavación (por ejemplo, cunetas verdes y pavimento permeable) en zonas de menor conflicto con servicios existentes.

#### **3.2 Método y diseño de la investigación**

La estructura planteada en la presente investigación ha sido una aplicación del método científico en el ámbito de estudios proyectuales sobre ingeniería sanitaria e ingeniería civil. Por otra parte, respecto al diseño propio del estudio como investigación científica se ha seguido el procedimiento planteado en la Figura 31, la cual será tratada de manera detallada en el presente capítulo.

**Figura 31***Diseño de la investigación*



### 3.3 Fisiografía de las áreas de estudio

#### 3.3.1 Geomorfología de la cuenca

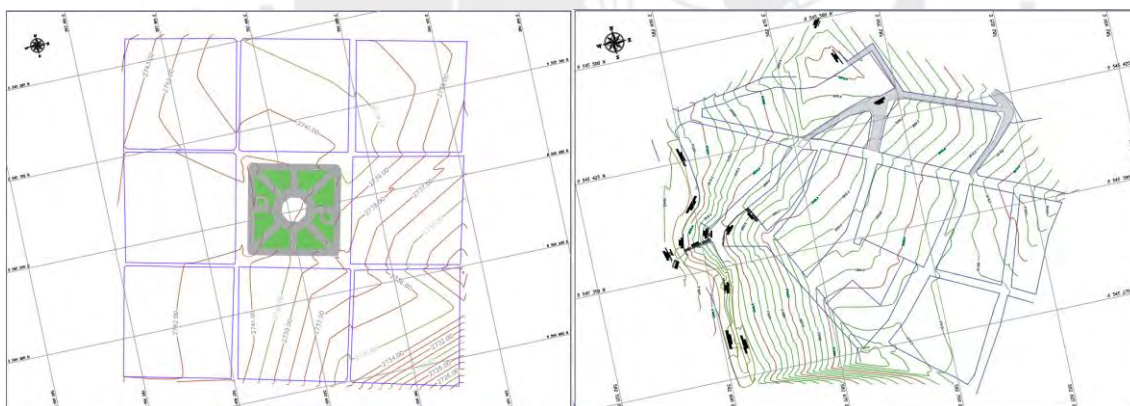
##### 3.3.1.1 Cuencas internas al área de estudio

Para determinar la geomorfología de las cuencas de estudio, es necesario primero, delimitar la cuenca urbana o el área de drenaje. Para el desarrollo de esta investigación, se han contemplado dos áreas de estudio, la primera está ubicada en los alrededores de la Plaza Mayor de Huamanga y la segunda área está ubicado en el cerro La Picota.

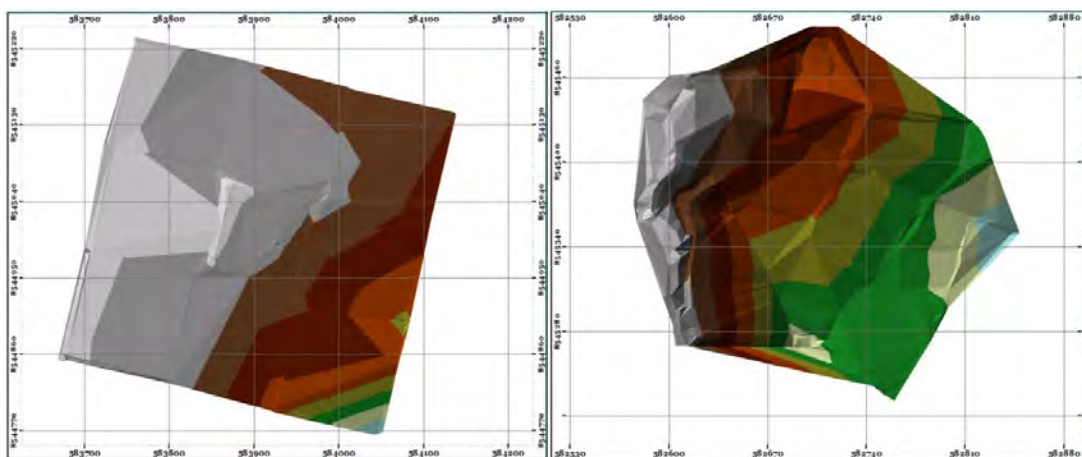
Para la obtención de datos topográficos precisos georreferenciados de la zona de estudio se ha utilizado equipos de topografía, precisamente un GPS diferencial. Este trabajo fue posteriormente tratado con ayuda del software Civil 3D para procesar y crear una representación digital del terreno, en la que figuran tanto las calles como las curvas de nivel.

#### Figura 32

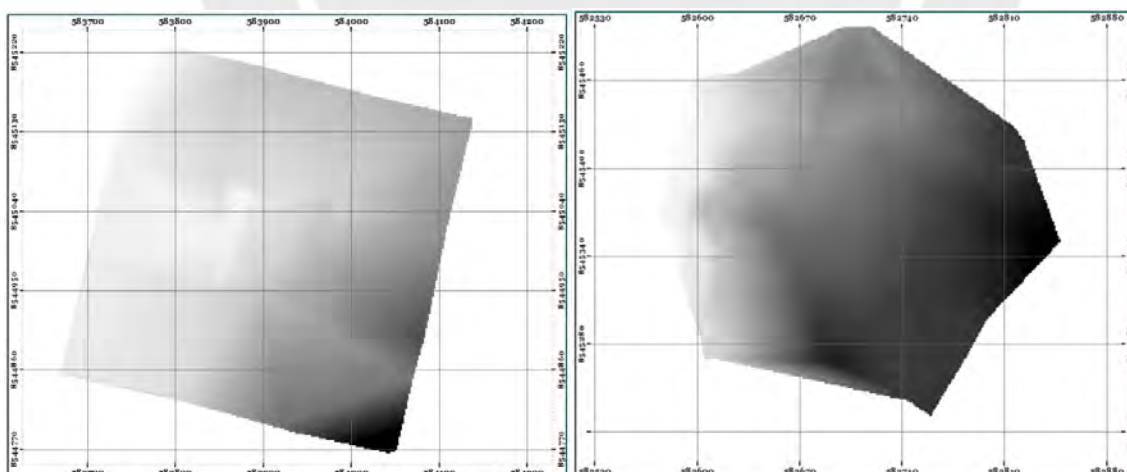
##### *Topografía de áreas de estudio*



Mediante la exportación de esta representación en Civil 3D al software ArcGIS 10.5, se obtiene un mapa en formato .TIN (Triangulated Irregular Network), esto es una estructura con datos vectoriales que compone los elementos tridimensionales como un conjunto de triángulos.

**Figura 33***Mapa TIN de áreas de estudio*

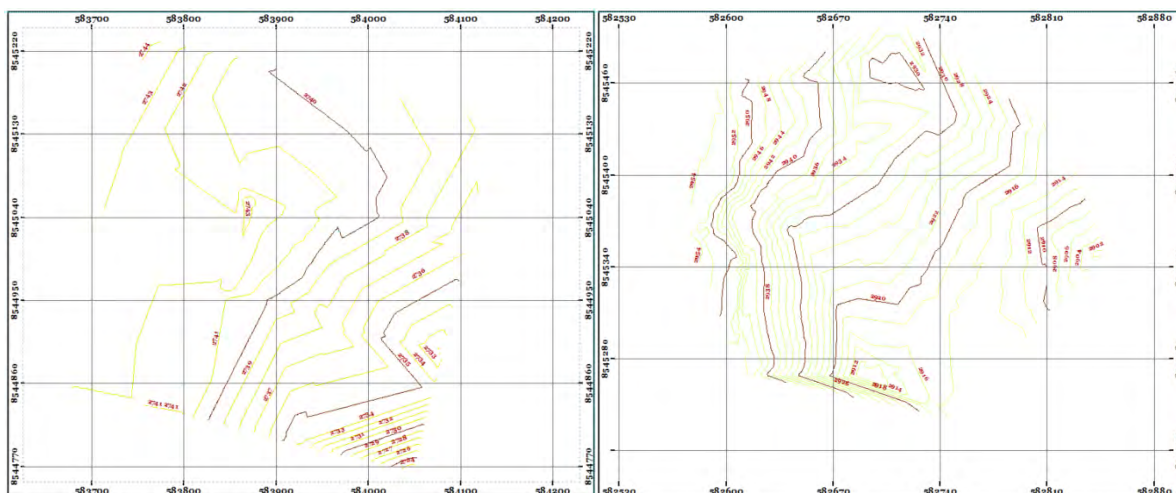
Sin embargo, ya que se busca sobreponer las curvas de nivel a la imagen satelital del área de estudio. En necesario, convertir el mapa .TIN a un Modelo de Elevación Digital (DEM, por sus siglas en ingles), ya que esta información representa los valores de elevación continuos sobre una superficie topográfica a través de un conjunto regular de valores z.

**Figura 34***Mapas DEM de áreas de estudio*

A partir del DEM, se generaron curvas de nivel. Estas curvas representan líneas que conectan puntos con la misma elevación relativa, las cuales se utilizan para representar la topografía del terreno y determinar el sentido del flujo del agua.

**Figura 35**

*Curvas de nivel de áreas de estudio*



Utilizando las curvas de nivel y los límites de propiedad, se obtiene la delimitación de las cuencas urbanas y la medida correspondiente al área de cada una.

**Figura 36**

*Delimitación de áreas tributarias de caudal en el área de Plaza Mayor de Huamanga*

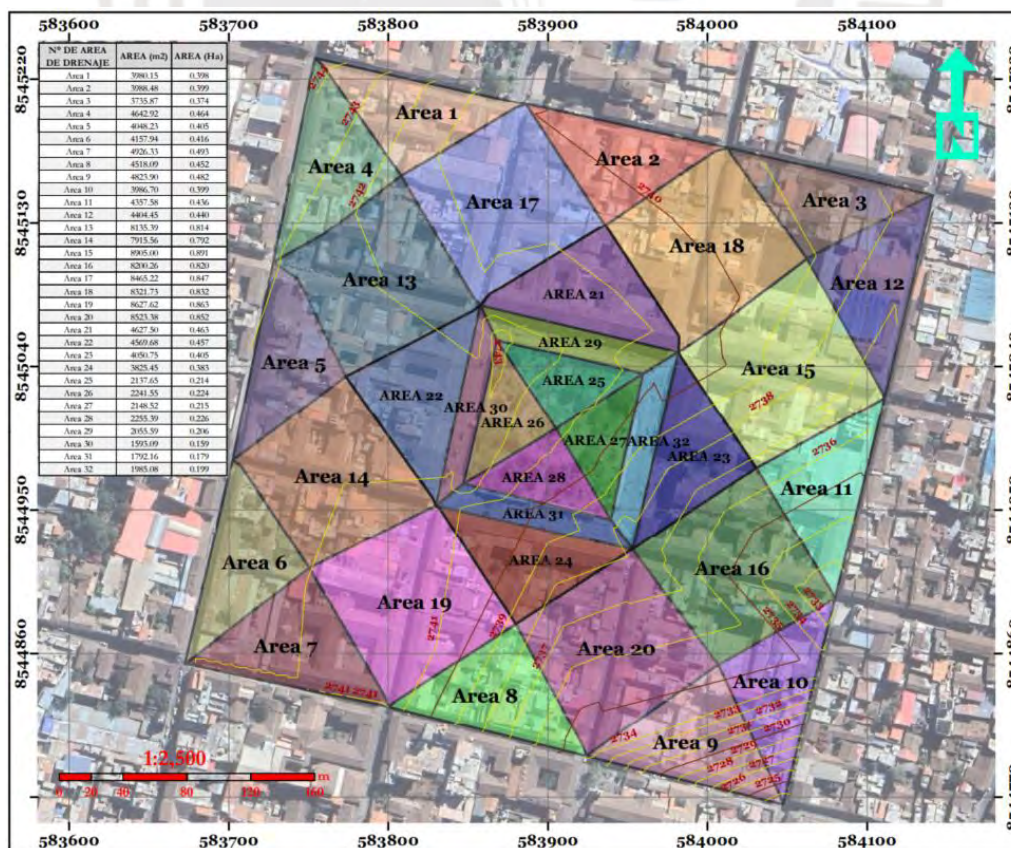


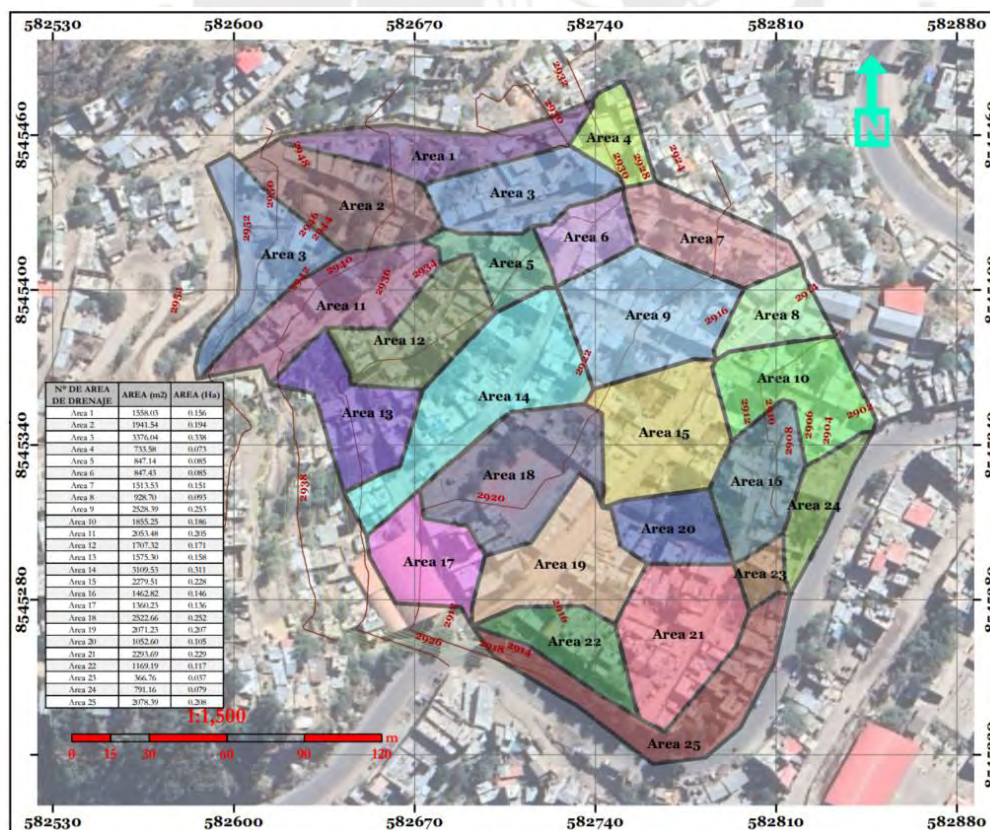
Tabla 6

Áreas tributarias de caudal en el área de Plaza Mayor de Huamanga

Descripción	Área (m <sup>2</sup> )	Descripción	Área (m <sup>2</sup> )
Área 1	3,980.15	Área 17	8,465.22
Área 2	3,988.48	Área 18	8,321.73
Área 3	3,735.86	Área 19	8,627.62
Área 4	4,642.92	Área 20	8,523.38
Área 5	4,048.23	Área 21	4,627.50
Área 6	4,157.94	Área 22	4,569.68
Área 7	4,926.33	Área 23	4,050.75
Área 8	4,518.09	Área 24	3,825.45
Área 9	4,823.90	Área 25	2,137.65
Área 10	3,986.70	Área 26	2,241.55
Área 11	4,357.57	Área 27	2,148.52
Área 12	4,404.45	Área 28	2,255.39
Área 13	8,135.38	Área 29	2,055.39
Área 14	7,915.56	Área 30	1,593.09
Área 15	8,905.00	Área 31	1,792.16
Área 16	8,200.26	Área 32	1,985.08

Figura 37

Delimitación de áreas tributarias de caudal en el área de Ladera de Cerro la Picota



**Tabla 7**

*Áreas tributarias de caudal en el área de Ladera de Cerro la Picota*

<b>Descripción</b>	<b>Área (m2)</b>	<b>Descripción</b>	<b>Área (m2)</b>
Área 1	1,558.03	Área 13	1,575.30
Área 2	1,941.54	Área 14	3,109.53
Área 3	3,376.04	Área 15	2,279.51
Área 4	733.58	Área 16	1,462.82
Área 5	847.15	Área 17	1,360.23
Área 6	847.43	Área 18	2,522.66
Área 7	1,513.53	Área 19	2,071.23
Área 8	928.70	Área 20	1,052.60
Área 9	2,528.38	Área 21	2,293.69
Área 10	1,855.25	Área 22	1,169.19
Área 11	2,053.48	Área 23	366.76
Área 12	1,707.32	Área 24	791.16
		Área 25	2098.39

### **3.3.1.2 Cuencas externas al área de estudio**

Las áreas externas a las zonas intervenidas con el equipo topográfico han sido delimitadas conjuntamente mediante el uso de un DEM de 5 metros por bit y delimitaciones manuales debido a que estos DEM's, los cuales han sido descargados de la plataforma de *Alaska Satellite Facility - Distributed Active Archive Center*, presentan errores para áreas pequeñas como las zonas que fueron intervenidas.

Los mapas obtenidos, y las áreas que corresponden a cada una de las áreas externas se muestran a continuación:

#### *Cerro La Picota*

Las áreas para las cuencas delimitadas en la figura mostrada son:

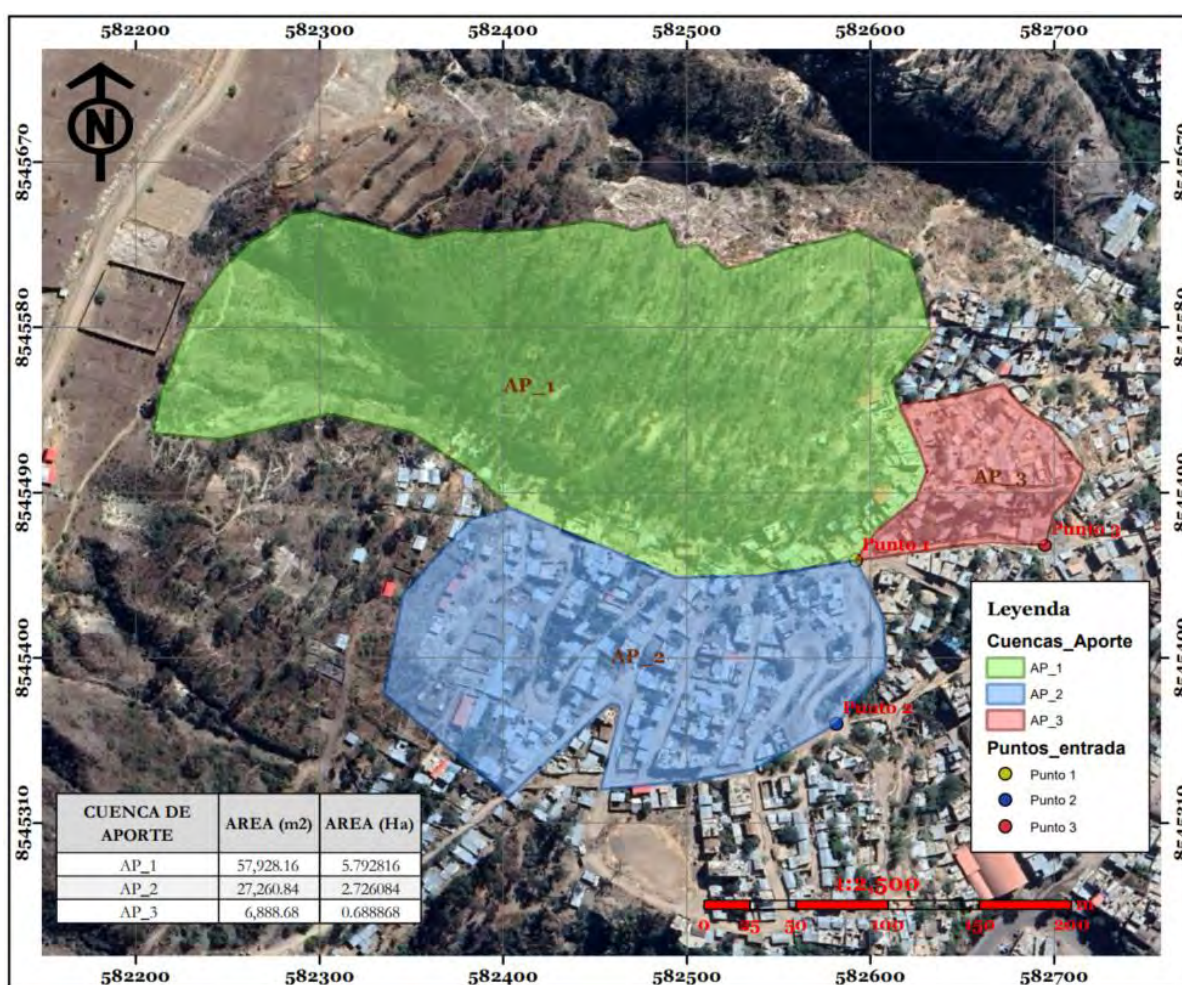
**Tabla 8**

*Áreas de cuencas afluentes al área de Ladera de Cerro la Picota*

Descripción	Área (m <sup>2</sup> )
AP_1 Área 1	57,928.16
AP_2 Área 2	27,260.84
AP_3 Área 3	6,888.68

**Figura 38**

*Delimitación de cuencas afluentes al área de Ladera del Cerro la Picota*



*Plaza Mayor de Huamanga*

Las áreas para las cuencas delimitadas en la figura mostrada son:

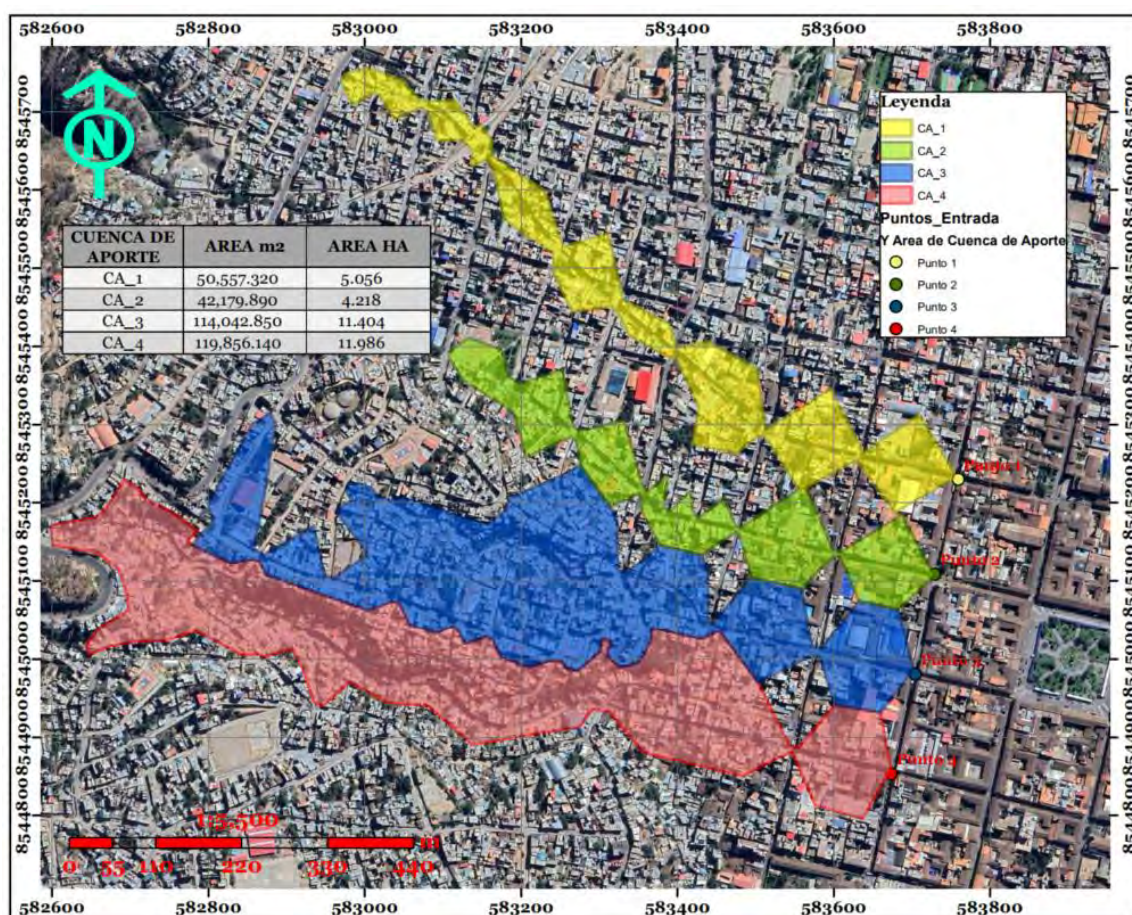
**Tabla 9**

*Áreas de cuencas afluentes al área de Plaza Mayor de Huamanga*

Descripción	Área (m2)
CA_1 Área 1	50,557.32
CA_2 Área 2	42,179.89
CA_3 Área 3	114,042.85
CA_4 Área 4	119,856.14

**Figura 39**

*Delimitación de cuencas afluentes al área de Plaza Mayor de Huamanga*



### 3.4 Determinación de las curvas de intensidad-duración-frecuencia

#### 3.4.1 Análisis pluviométrico

La recolección de precipitaciones máximas en 24 horas se dio de estaciones convencionales del SENAMHI (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú) y el ANA (Autoridad Nacional del Agua). La estación Huamanga nos brindó información de 30 años, desde el año 1986 hasta el 2015. Para el desarrollo de esta tesis se trabajó con las

precipitaciones máximas en 24 horas en un año de los últimos 30 años del registro mencionado.

De los datos obtenidos, se observó que los valores de precipitación no son del todo parecidos, por ejemplo, el dato máximo (41.90 mm) se presentó el año 2015 y el dato mínimo (17.70 mm) se presentó en el año 2007. Esto, y el uso de una estación convencional, nos indica que debemos hacer una prueba de datos dudosos.

El detalle de todas las precipitaciones máximas en 24 horas de las estaciones, se observan en el Anexo 1.

Debido a que la estación Huamanga usada es convencional, se realizó un análisis de datos dudosos, esto con el fin de encontrar puntos que se alejen de la tendencia de la información restante, esto debido a que la retención o eliminación de estos datos puede afectar significativamente la magnitud de los parámetros estadísticos calculados para la información, especialmente porque estamos manejando muestras pequeñas (20). El cálculo se hizo de acuerdo con el método Water Resources Council (1981).

A continuación, se muestra el análisis respectivo de la prueba de los datos dudosos:

Como se sabe se cuenta con 20 datos, entonces:

$$n = 20$$

$$K_n = 2.563$$

$K_n$ : valor recomendado, según el valor de  $n$ .

El umbral de los datos dudosos altos ( $x_H$ )

$$x_H = \bar{x} + K_n \cdot S$$

$$x_H = 1.4070 + 2.563 \times 0.0841$$

$$x_H = 1.6227$$

Entonces, la precipitación máxima será:

$$P_H = 10^{x_H}$$

$$PH = 41.9 \text{ mm}$$

El umbral de los datos dudosos bajos (xL)

$$XL = x - Kn.S$$

$$XL = 1.4070 - 2.563 \times 0.0841$$

$$XL = 1.1914$$

Entonces, la precipitación mínima será:

$$PL = 10^{XL}$$

$$PL = 15.50 \text{ mm}$$

### ***3.4.1.1 Análisis Estadístico***

#### *Periodo de retorno*

Definir el periodo de retorno en un estudio hidrológico es de suma importancia, pues es vital conocer la probabilidad de recurrencia de un evento, en este caso, precipitación.

Esta estimación estadística está basada en la data histórica que obtuvimos de la estación convencional Huamanga y muestra el intervalo promedio de recurrencia sobre un periodo extendido de tiempo. El periodo de retorno se calcula con la inversa de la probabilidad que la precipitación sea excedida en un año determinado.

Para el desarrollo de este trabajo de investigación, al tener dos áreas de estudio (Plaza Mayor y laderas del Cerro La Picota) se definió el periodo de retorno para cada caso.

En el caso de la Plaza Mayor de Huamanga, al pertenecer a una cuenca urbana, la Norma CE.040 Drenaje Pluvial (2021) recomienda, para drenaje urbano menor, periodos de retorno de 2 a 10 años, sin embargo, también recomienda que el diseñador podrá proponer periodos de retorno mayores a los mencionados según su criterio. Por otra parte, las laderas del cerro la Picota están influenciadas por prácticamente toda la quebrada del cerro, es por ello que, por recomendación del Manual de Hidrología Hidráulica y Drenaje del Ministerio

de Transporte y Comunicaciones (2011), para ambas zonas de estudio se ha trabajado con un periodo de 50 años.

Según el análisis de prueba de bondad de ajuste (Kolmogorov - Smirnov), se observa que los valores con menor diferencia le pertenecen a la **distribución de Gamma**; es por ello que se decidió trabajar con esta función, y los resultados fueron los siguientes:

**Tabla 10**

*Prueba de bondad del ajuste de Kolmogorov Smirnov*

Kolmogorov-Smirnov test for	a=1%	a=5%	a=10%	Attained a	DMax
<b>Gamma</b>	<b>ACCEPT</b>	<b>ACCEPT</b>	<b>ACCEPT</b>	<b>99.9100%</b>	<b>0.06059</b>
LogNormal	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	99.6859%	0.0663
GEV-Min (L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	99.6307%	0.06716
Normal	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	99.4279%	0.06964
GEV-Min	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	99.3961%	0.06996
Pearson III	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	99.3033%	0.07084
GEV-Max (L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	99.2897%	0.07096
Normal (L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	99.2522%	0.07129
Log Pearson III	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	99.0201%	0.07308
Galton	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	98.9403%	0.07362
GEV-Max	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	98.8276%	0.07434
EV1-Max (Gumbel)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	98.3971%	0.07669
EV1-Max (Gumbel)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	97.2846%	0.08121
GEV-Max (kappa specified)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	91.9123%	0.09378
EV2-Max (L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	91.7730%	0.09402
EV3-Min (Weibull)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	90.9274%	0.09547
EV3-Min (Weibull)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	90.3402%	0.09643
Exponential	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	89.9412%	0.09707
GEV-Min (kappa specified)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	87.6097%	0.10058
Exponential (L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	87.4053%	0.10087
GEV-Min (kappa specified)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	87.1962%	0.10117
EV2-Max	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	82.7061%	0.10712
GEV-Max (kappa specified)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	80.6067%	0.1097
Pareto (L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	63.5838%	0.12869
EV1-Min (Gumbel)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	54.8931%	0.13822
EV1-Min (Gumbel)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	53.7016%	0.13956
Pareto	ACCEPT	ACCEPT	REJECT	5.9627%	0.23466

**Tabla 11**

*Precipitaciones máximas anuales en 24 horas según la distribución utilizada (Gamma)*

Tr (años)	$P(X \leq x_T)$	$P_{MAX}$ mm
2	0.500	25.7
5	0.800	30.3
10	0.900	32.9
25	0.960	35.8
50	0.980	37.8
100	0.990	39.6
200	0.995	41.4
300	0.997	42.3
500	0.998	43.5

La intensidad es la tasa temporal de precipitación por unidad de tiempo. Además, 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. La metodología consistió en muestreos sobre el pluviógrafo respectivo, con el fin de obtener las intensidades máximas por año, para las duraciones de 120, 90, 60, 50, 40, 30, 20 y 10 minutos.

Una vez definidas las tablas de uso práctico y diseñadas las curvas IDF para la estación Huamanga, se analizó el comportamiento de las variables involucradas en este estudio, relacionando simultáneamente las tres variables en una familia de curvas, para lo cual se utilizó la siguiente ecuación:

$$I = \frac{k \cdot T^m}{D^n}$$

Además, se utilizó el modelo de Ven Te Chow, Gambel y Dyck; es por eso que se usó las siguientes relaciones:

$$k_T = \frac{\sqrt{6}}{\pi} \cdot \left( 0,5772 + \ln \left( \frac{T}{T-1} \right) \right)$$

$$PP = \bar{x} + \sigma \cdot k_T$$

$$Pd = P_{24} \cdot \left( \frac{d}{1440} \right)^{0.25}$$

Donde:

Pd = precipitación total (mm)

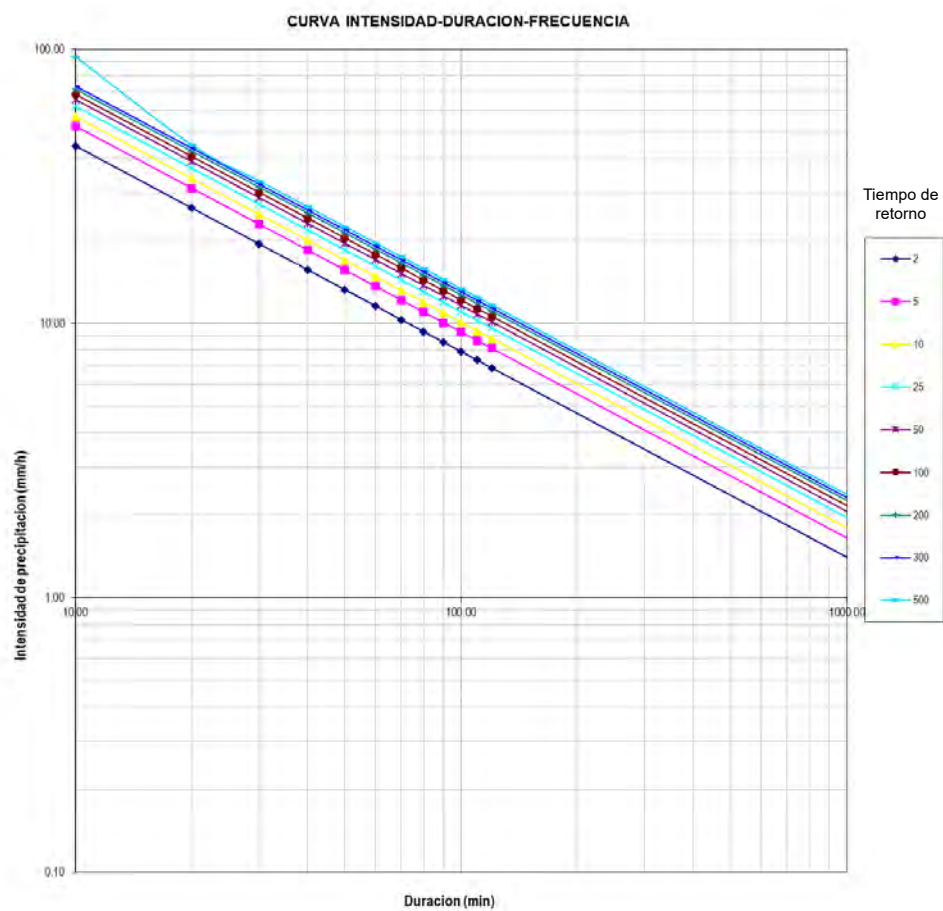
d = duración en minutos

P24 = Precipitación máxima en 24 horas (mm)

De esta manera se obtuvieron las siguientes curvas IDF:

**Figura 40**

*Curva logarítmica de intensidad-duración-frecuencia*



### 3.5 Cálculo del tiempo de concentración por el método de Kirpich

El tiempo de concentración en una cuenca de estudio, es el tiempo que demoraría, hipotéticamente, una gota en viajar desde el punto más alejado (medido sobre la trayectoria del cauce) hasta la sección de análisis. Además, todos los sectores dentro de la cuenca están aportando a la vez sobre la sección de análisis produciendo los picos de caudal.

Si bien es cierto, existen muchos métodos para calcular el tiempo de concentración, para nuestro trabajo de investigación aplicaremos el método de Kirpich, el cual, calcula el tiempo de concentración en base a la longitud principal y pendiente promedio del mismo, como se puede apreciar en la siguiente fórmula:

$$T_c = 0,01947 \cdot \frac{L^{0.77}}{S^{0.385}}$$

Donde:

L=Longitud del canal desde aguas arriba hasta la salida, m

S=Pendiente promedio de la cuenca, m/m

Ecuación 1. Tiempo de concentración por el método de Kirpich

Se emplea esta fórmula debido a que es la que mejor se adapta a las condiciones del terreno de las zonas de estudio, suelos de altas pendientes y cuencas de tamaño medio. Además, según el manual del MTC es posible ajustar los valores de tiempo de concentración obtenidos por factores de diseño dependiendo del tipo de pavimento de las vías, 0.4 para asfalto y 0.2 para concreto. En nuestro caso se multiplicará al final por un valor de 0.2 ya que las calles que conforman la cuenca urbana son de material de concreto.

Para el cálculo del tiempo de concentración en la Plaza Mayor de Huamanga hay que distinguir las 4 subcuencas principales que llegan hasta el área de interés. Cada subcuenca está conformada por pendientes distintas y son las que formarán el flujo de agua de escorrentía que pasará por la zona de interés. Sin embargo, se estima que los tiempos de

concentración para las distintas áreas de drenaje que forman la cuenca urbana de la Plaza Mayor de Huamanga, tienen tiempos de concentración menores a 10 minutos. Según la Norma CE.040 Drenaje Pluvial (2021) no es posible trabajar con valores de tiempo de concentración menores a 10 minutos, por este motivo la norma recomienda trabajar con un valor mínimo de  $T_c$  de 10 minutos, para así evitar sobredimensionamientos en las estructuras de drenaje.

### 3.6 Cálculo de caudales de diseño por el método racional modificado

Esta metodología estima el caudal máximo a partir de la precipitación, abarcando todas las abstracciones en un solo coeficiente de escorrentía “C”, el cual es estimado en base a las características de la cuenca.

Este método supone que la intensidad y la distribución de la lluvia en la cuenca son uniformes en toda su área y ocurre durante un periodo de tiempo igual al tiempo de concentración de la cuenca.

La descarga máxima se calcula según la relación:

$$Q = \frac{C \cdot I \cdot A}{3.6} \left( \text{en } \frac{m^3}{s} \right)$$

Donde:

Q: Máximo caudal que aporta una cuenca en su punto de desagüe ( $m^3/s$ ).

I: Intensidad máxima de la lluvia (mm/h) que se espera pueda producirse en un período de retorno ( $T_r$ ) dado y una duración igual al tiempo de concentración de la cuenca ( $T_e$ ).

A: Área de la cuenca ( $km^2$ ) que contribuye a la escorrentía que pasa por la sección de análisis.

Los coeficientes de escorrentía que se escogieron para la cuenca urbana de la Plaza Mayor de Huamanga dependían del tipo de material y usos de edificación alrededor del área de interés.

A continuación, se adjunta la tabla de coeficientes de escorrentía utilizados para el método racional dentro de las áreas analizadas según Aranda (2010):

Cuadro resumen de los coeficientes C de escorrentía empleados:

**Tabla 12**

*Coefficientes de escorrentía para áreas identificadas en la ciudad de Huamanga*

<b>Coefficiente de escorrentía</b>	<b>C</b>
Pavimento rígido (concreto)	0.9
Suelo Arcilloso Terreno inclinado (>7%)	0.5
Techos de concreto	0.88
Techos Calamina	0.95

Nota: Tomado de *Introducción a la hidrología urbana* (p. 6-4), por Campos Aranda, 2010.

A partir de estos valores, se ha considerado las Figuras 41 y 42, además de las imágenes satelitales de Google Earth, con la finalidad de estimar el valor promediado del coeficiente de escorrentía de las áreas descritas en las Tablas 4 y 5. El cual se determina como el promedio ponderado, resultado de la sumatoria de cada multiplicación del coeficiente de una sección en específico por el área de la sección correspondiente al total del área, sobre el área total. A continuación, se explican de manera gráfica y matemática el cálculo del coeficiente de escorrentía de cada una de estas áreas.

Figura 41

Coeficiente de escorrentía promedio en área 1 afluente a Cerro La Picota

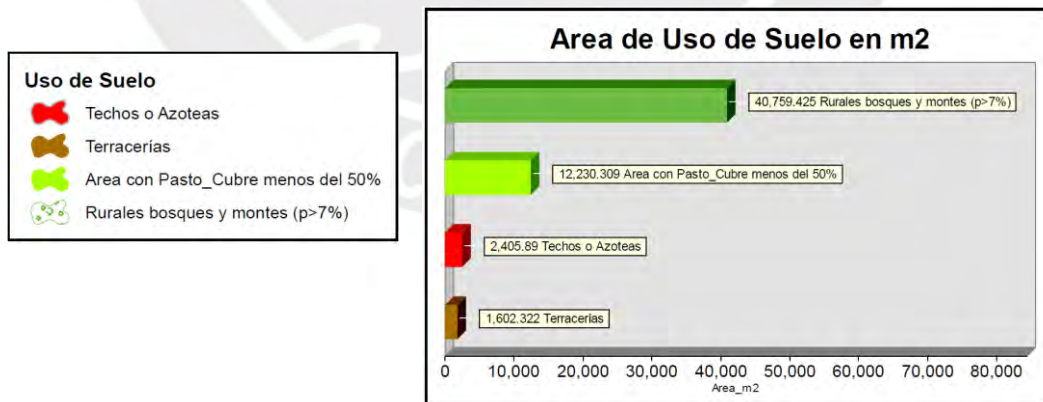
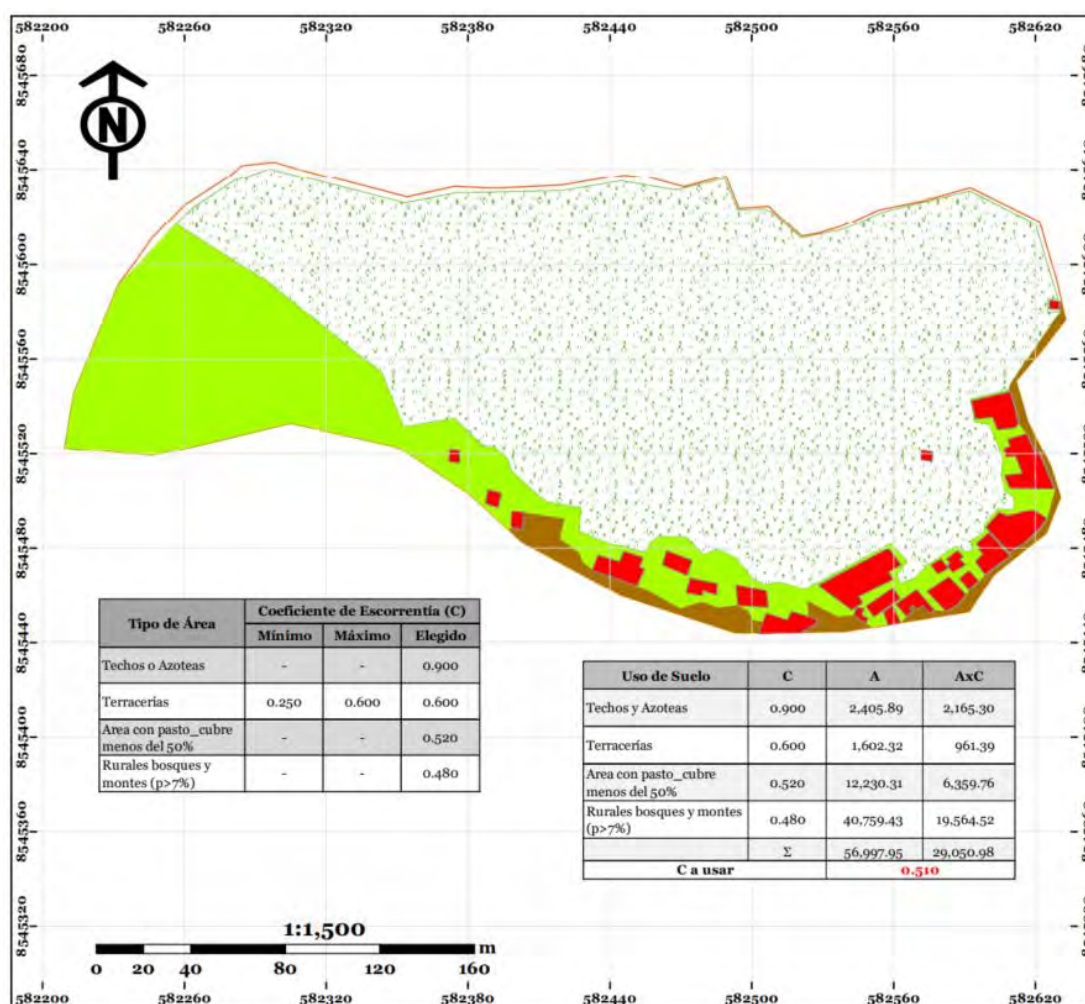


Figura 42

*Coefficiente de escorrentía promedio en área 2 afluente a Cerro La Picota*

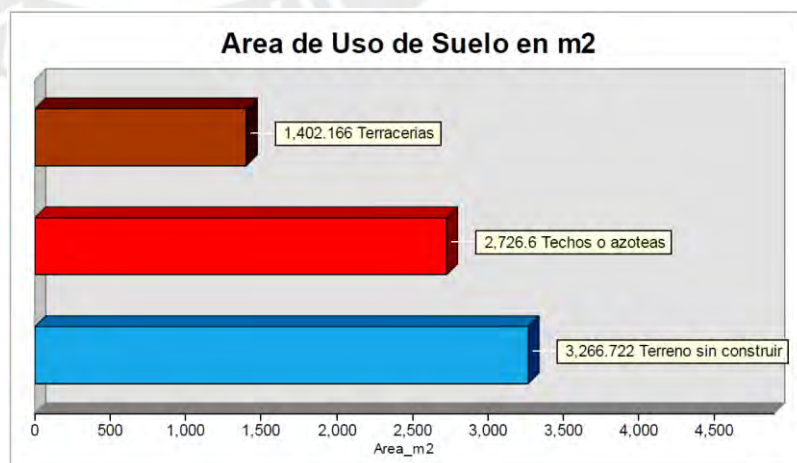
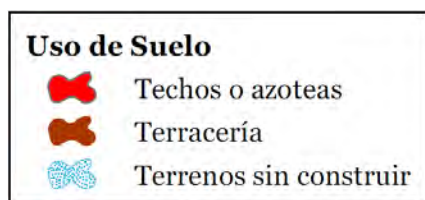
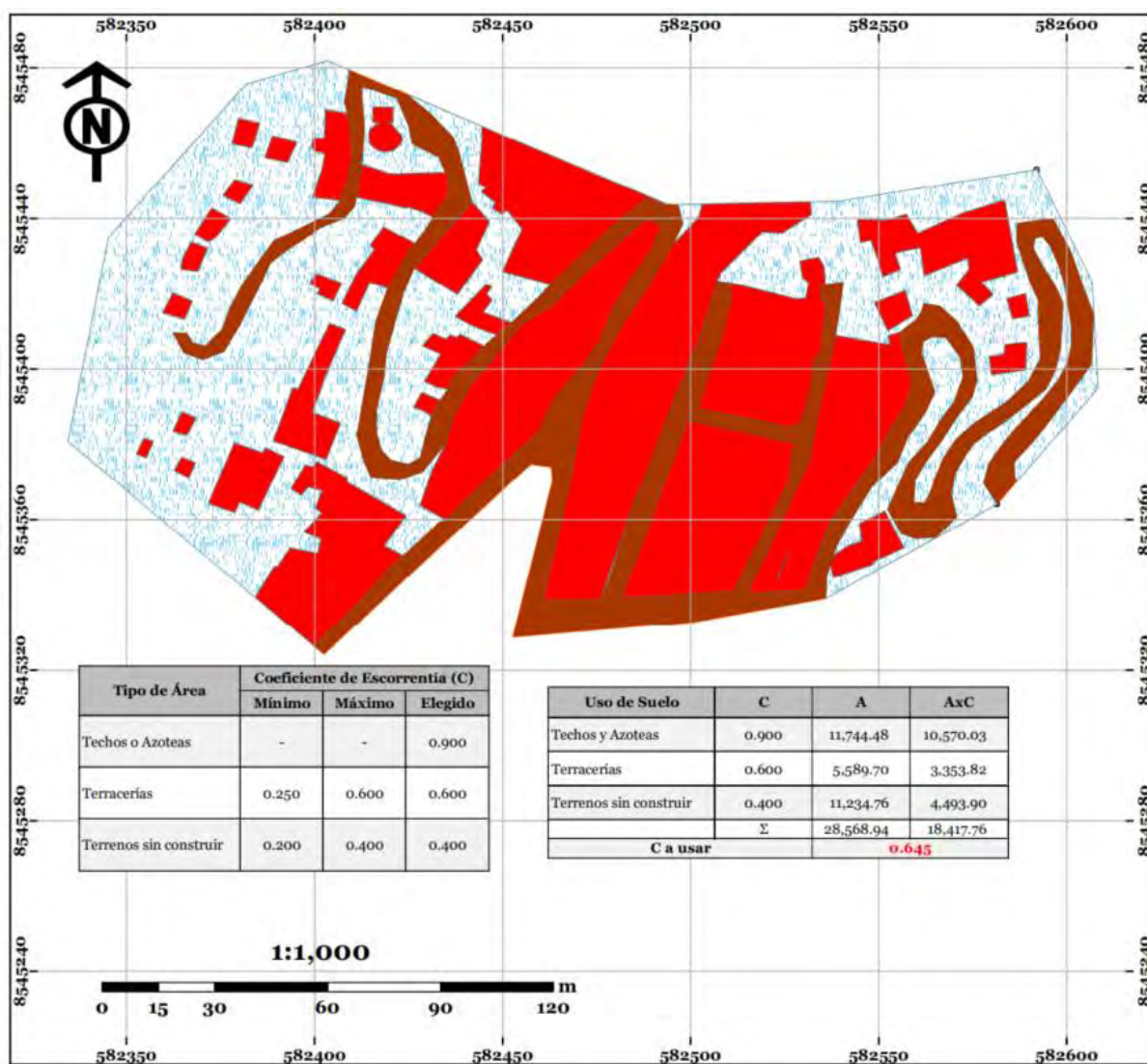


Figura 43

*Coefficiente de escorrentía promedio en área 3 afluente a Cerro La Picota*

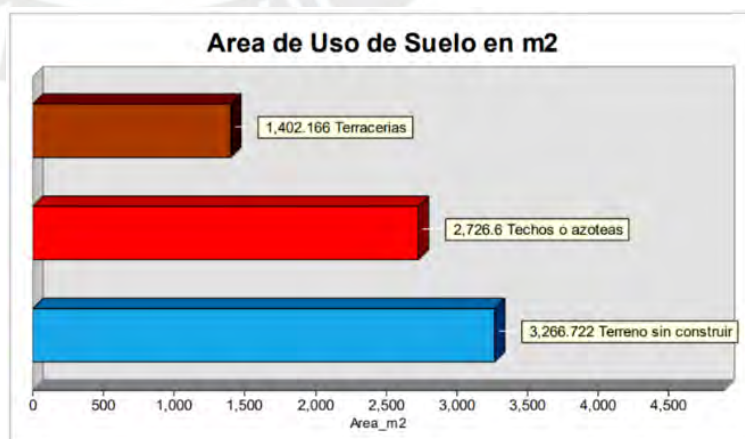
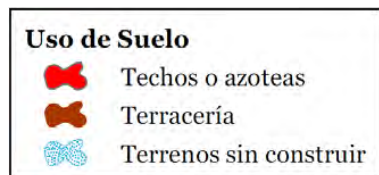
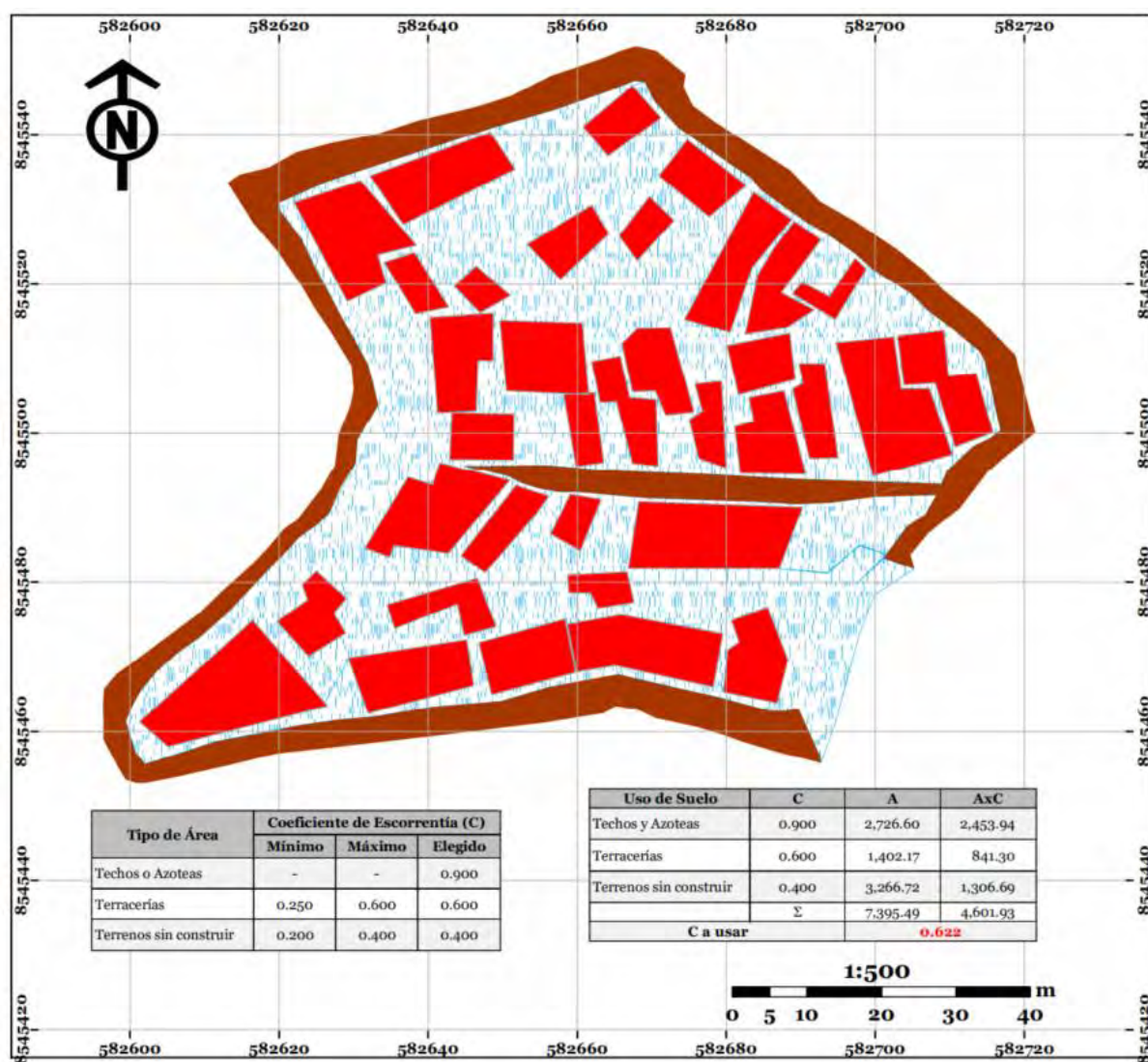


Figura 44

*Coefficiente de escorrentía promedio en área 1 afluente a Plaza Mayor de Huamanga*

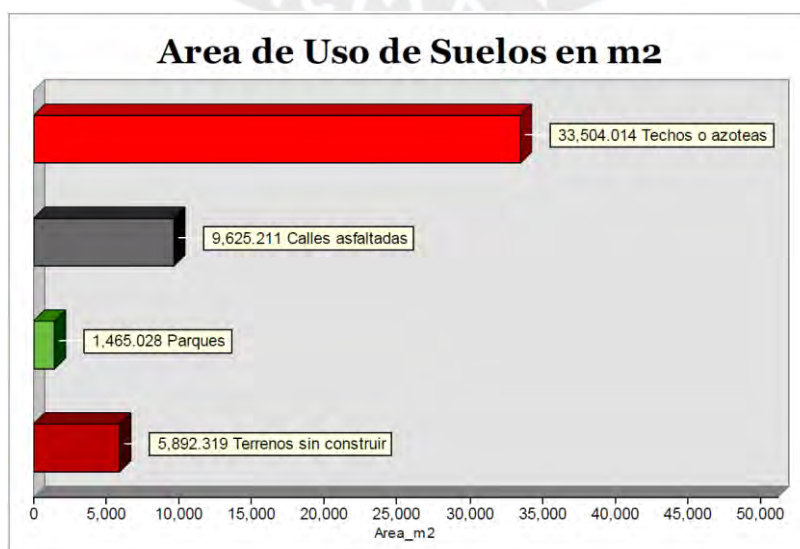
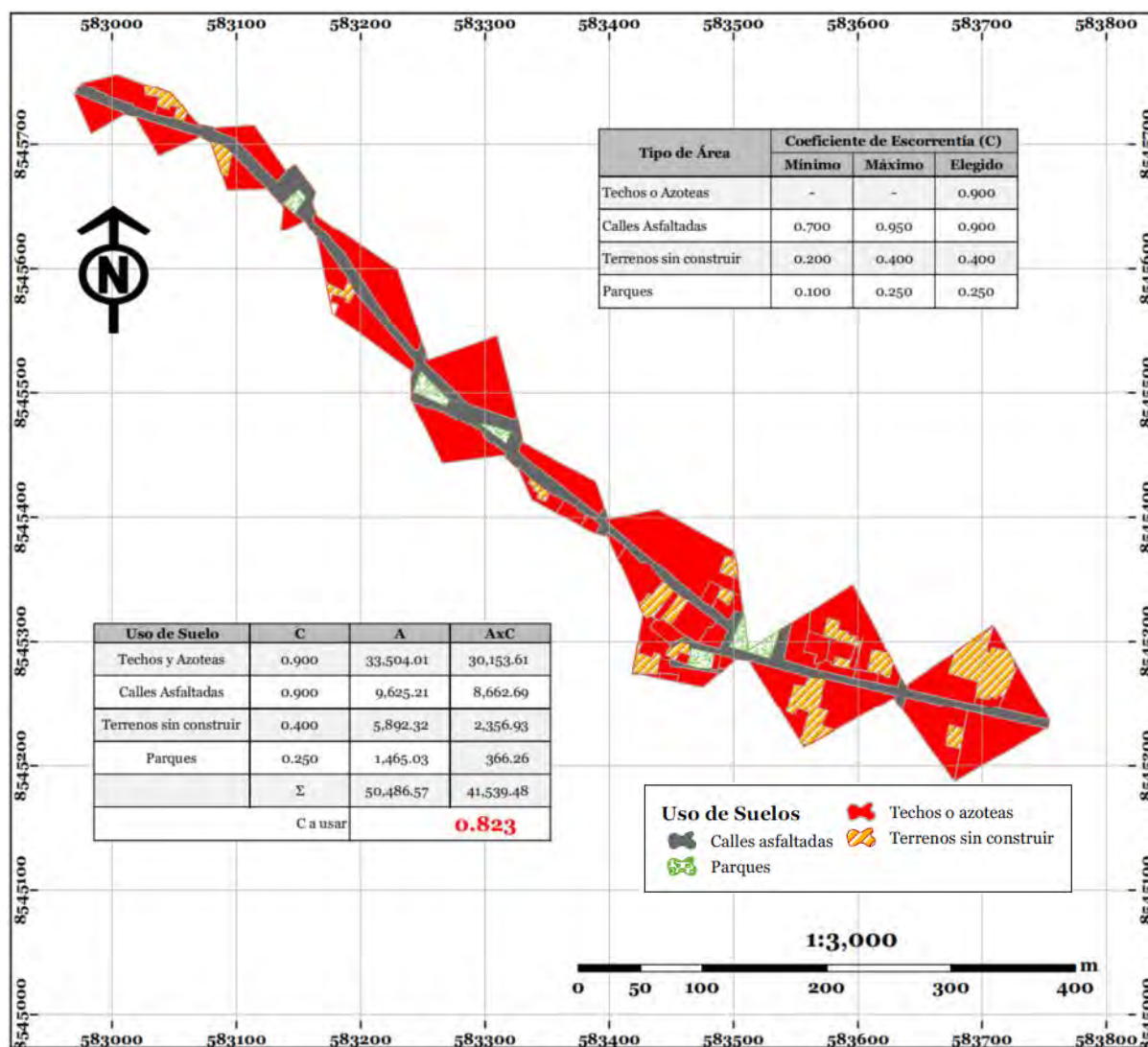
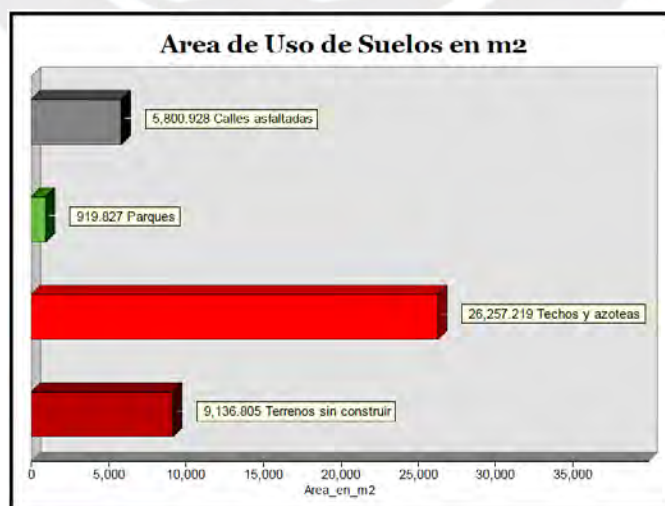
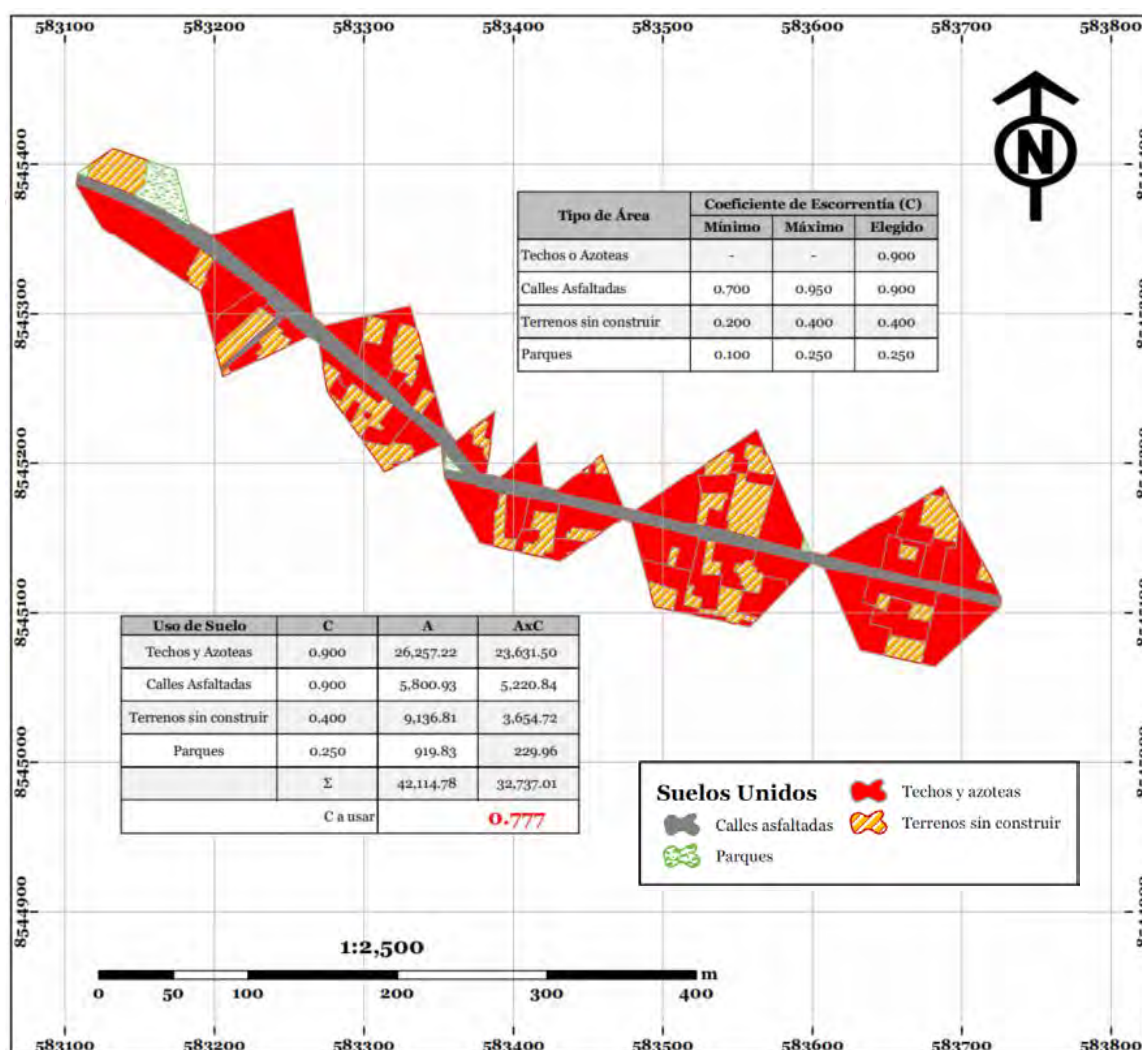


Figura 45

*Coefficiente de escorrentía promedio en área 2 afluente a Plaza Mayor de Huamanga*



**Figura 46**

*Coefficiente de escorrentía promedio en área 3 afluente a Plaza Mayor de Huamanga*

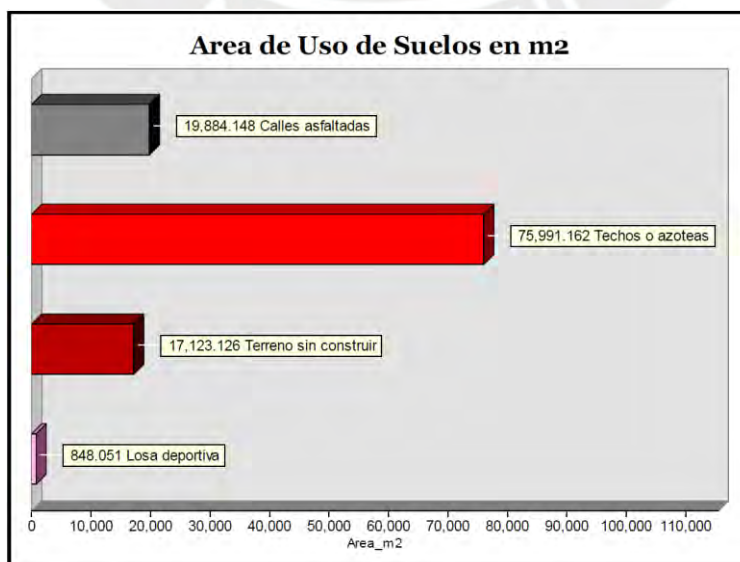
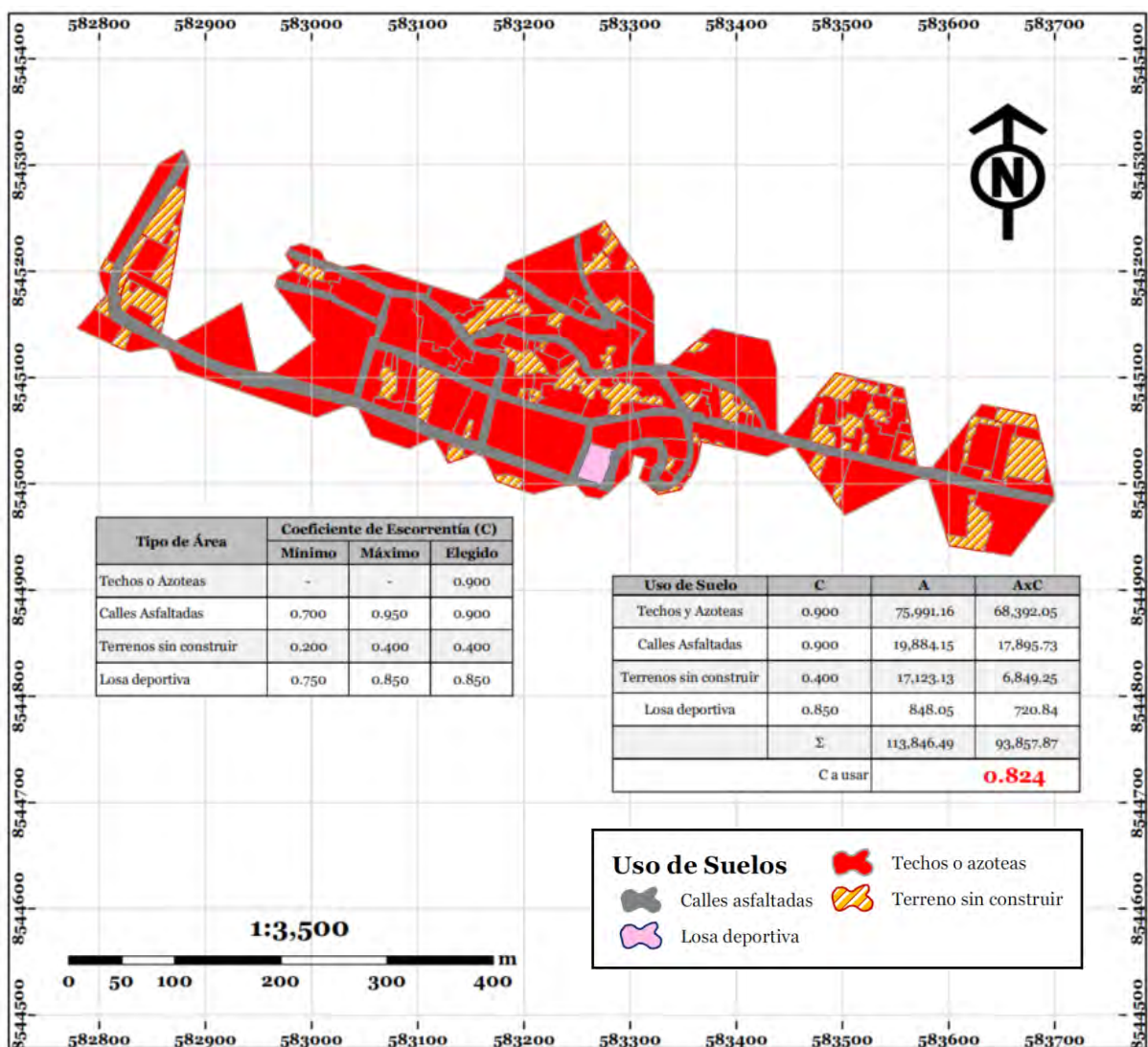
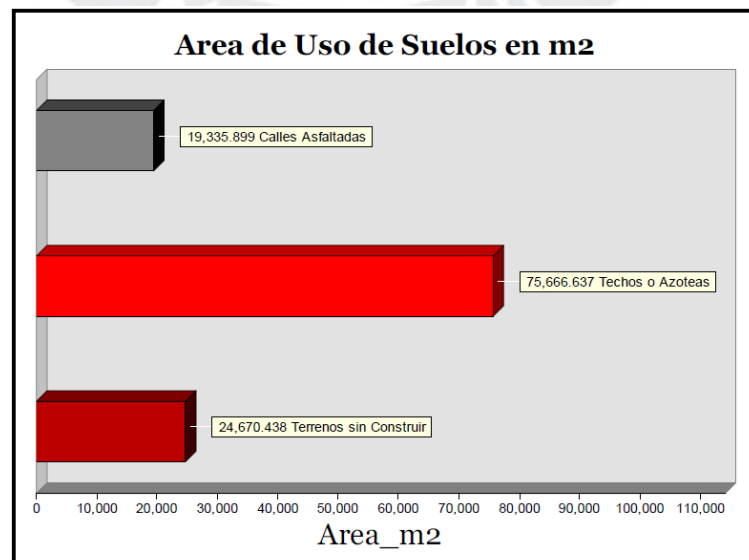
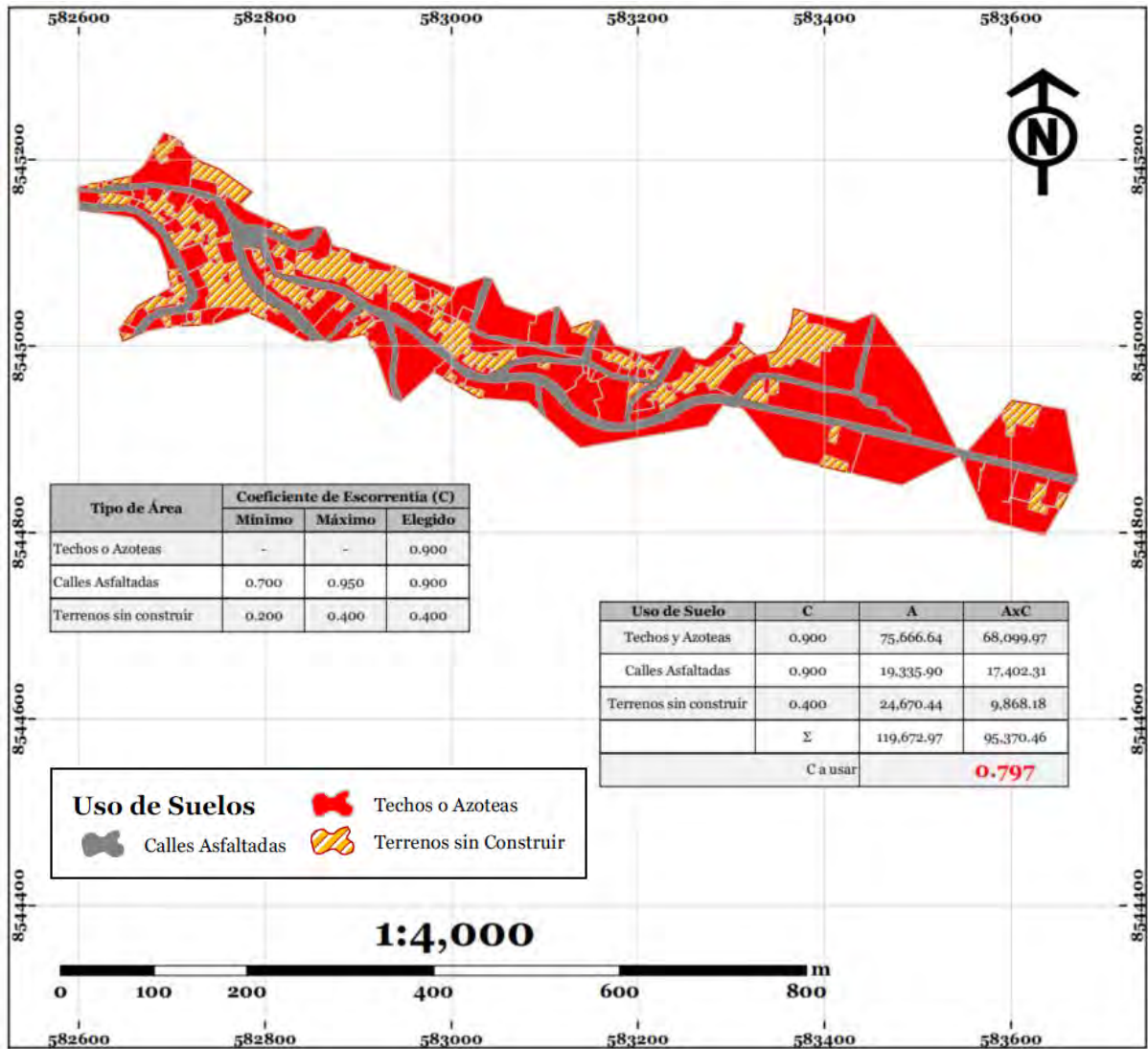


Figura 47

Coeficiente de escorrentía promedio en área 4 afluente a Plaza Mayor de Huamanga



Aplicando el Método racional en la cuenca urbana de la Plaza Mayor de Huamanga con un valor de intensidad para 10 minutos y un periodo de retorno de 50 años obtenida de la curva IDF igual a 65.42 mm/hr, se obtiene los siguientes valores de caudales de diseño en m<sup>3</sup>/s y se muestra un croquis del área de interés con la distribución de caudales de diseño y la esquematización del flujo hidráulico:

*Cerro La Picota*

Los caudales de ingreso son:

**Tabla 13**

*Estimación de caudales de cuencas afluentes al área de Cerro La Picota*

Descripción	Área (m <sup>2</sup> )	C	I (mm/h)	Q (m <sup>3</sup> /s)
Área 1	57,928.16	0.510	65.42	0.54
Área 2	27,260.84	0.645	65.42	0.32
Área 3	6,888.68	0.622	65.42	0.08

*Plaza Mayor de Huamanga*

Los caudales de ingreso son:

**Tabla 14**

*Estimación de caudales de cuencas afluentes al área de la Plaza Mayor de Huamanga*

Descripción	Área (m <sup>2</sup> )	C	I (mm/h)	Q (m <sup>3</sup> /s)
Área 1	50,557.32	0.823	65.42	0.76
Área 2	42,179.89	0.777	65.42	0.60
Área 3	114,042.85	0.824	65.42	1.71
Área 4	119,856.14	0.797	65.42	1.74

### 3.7 Estimación de caudal para el programa SWMM

El programa SWMM utiliza el modelo de Onda Dinámica como modelo de diseño para determinar el caudal a lo largo del tiempo mediante la resolución de las ecuaciones diferenciales y unidimensionales de Saint Venant. Para esto requiere como datos de ingreso el hietograma de diseño correspondiente al tiempo de retorno determinado según las

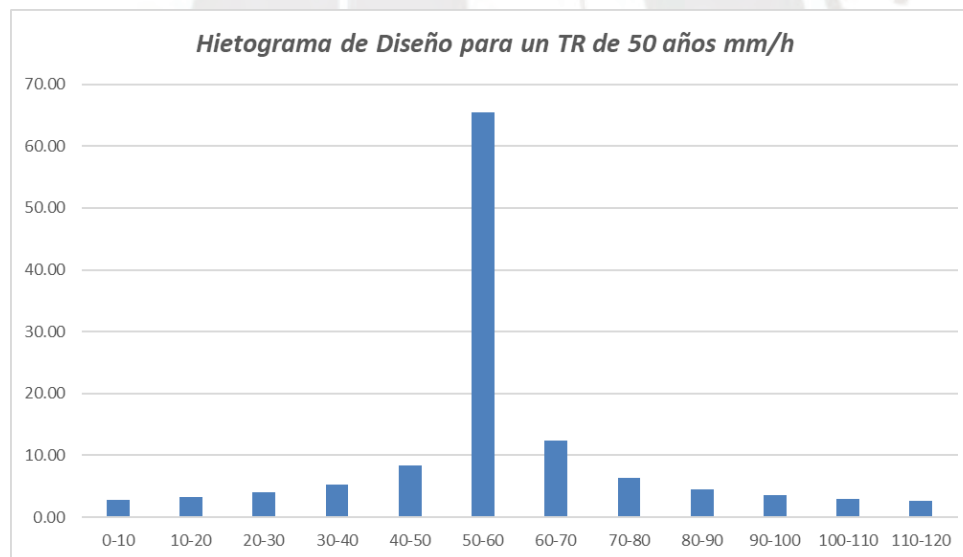
condiciones de la cuenca urbana analizada. El área de la cuenca urbana determina a su vez el tiempo de diseño para el cual se tiene que adaptar el hietograma. (Valentín, 2007)

Sin embargo, debido a que el área de análisis en ambos puntos es pequeña, se ha procedido a utilizar un hietograma de dos horas de duración, ya que, de otra manera, el programa puede devolver como valores de salida estimaciones de errores superiores al 200%, siendo el valor aceptable un error cercano a 5%. (Rossman, 2015)

El hietograma cargado al programa SWMM corresponde a un hietograma de dos horas de duración, y un tiempo de retorno de 50 años, el cual se ha determinado mediante el método de Bloques Alternos, y es mostrado a continuación:

**Tabla 15**

*Hietograma de diseño para un TR de 50 años*



### **3.8 Modelado computacional de áreas de estudio**

#### **3.8.1 Consideraciones previas al modelado en SWMM 5.2**

El software que fue utilizado para la simulación del comportamiento de una tormenta sobre los casos de áreas urbanas delimitadas anteriormente (Plaza Mayor de Huamanga y Cerro La Picota) ha sido SWMM 5.2. Y, el procedimiento seguido se muestra Anexo N° 02. Es necesario decir que se han elaborado cuatro simulaciones por cada uno de los dos casos que se estudian en la presente investigación. Estas simulaciones son:

1. Simulación de la zona con alcantarillado pluvial considerando caudales de las cuencas aportantes
2. Simulación de la zona con propuesta de SuDS considerando caudales de las cuencas aportantes
3. Simulación de la zona con alcantarillado pluvial sin considerar caudales de las cuencas aportantes
4. Simulación de la zona con propuesta de SuDS sin considerar caudales de las cuencas aportantes

El análisis de las cuatro condiciones especificadas para cada uno de los casos de estudio corresponde al entendimiento sobre el comportamiento de las cuencas urbanas ante tormentas de máximas avenidas. De esta manera, se busca analizar este comportamiento cuando la cuenca urbana recibe caudales externos y cuando esta es analizada de manera aislada a su entorno.

#### **3.8.2 Creación de redes de desagüe pluvial en SWMM 5.2**

La creación de nodos y líneas simulan en conjunto el rol de representar la morfología del drenaje pluvial. Los nodos pueden ser puntos de afluencia de caudales, pozos, buzones, o en general puntos de control respecto a los cuales es posible ingresar y analizar características tales como profundidad de agua, velocidad de agua en el nodo, entre otros. Por su parte, las

líneas representan la geometría y sección de las calles por las cuales ha de escurrir el agua, así como el drenaje pluvial ya sea este de tipo convencional o alguna metodología de los SuDS.

El proceso de dibujo de los nodos requiere previamente que se conozca el sentido de flujo que adoptara agua ya que de esta manera se agiliza el proceso de reconocer visualmente las cotas de cada uno de estos puntos. En ese sentido, el levantamiento topográfico es crucial para la identificación de las cotas del plano así como de la forma y dimensiones de las calles.

### **3.9 Propuesta y diseño de SuDS**

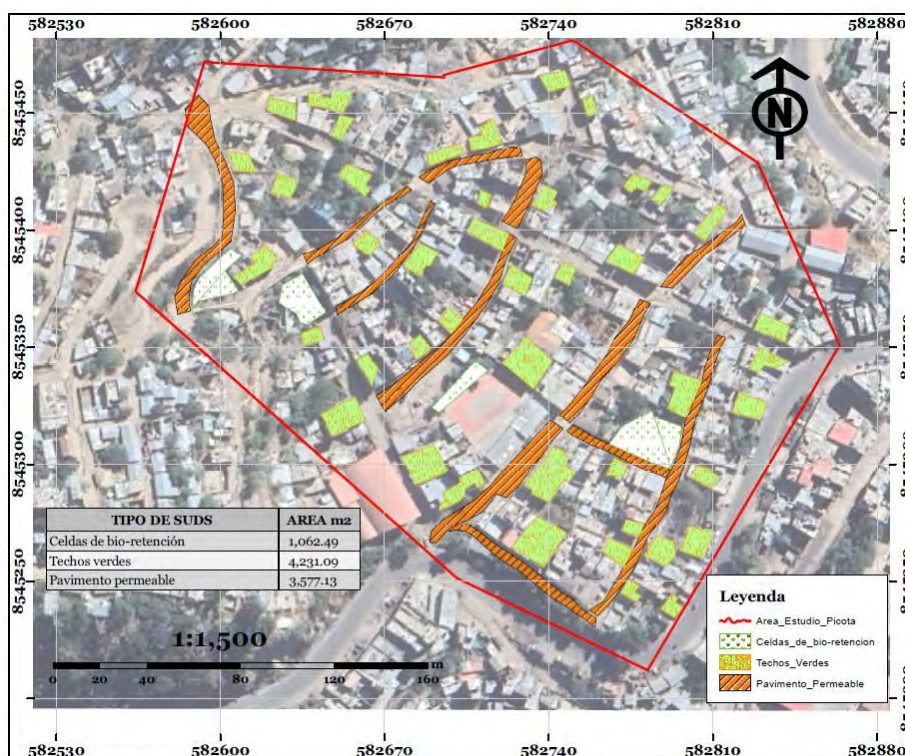
Dentro de las alternativas de SuDS que pueden aplicarse en las dos zonas de estudio de la presente investigación, se han elegido aquellas que pueden adaptarse a las condiciones urbanas, así como las restricciones de espacios y tipos de edificaciones.

#### **3.9.1 Propuesta de SuDS en Cerro La Picota**

La zona de estudio correspondiente al Cerro La Picota presenta ciertas edificaciones con áreas grandes en las cuales se puede aprovechar el uso de SuDS de techos verdes. Asimismo, la disposición espacial de las vías, las cuales son angostas, permite únicamente el uso del pavimento permeable debido al reducido espacio con el que se cuenta en el área vial. Por último, existen ciertas áreas libres dentro del área de estudio en donde se pudieron observar espacios de jardinería pública, por lo cual en estas zonas se ha propuesto el uso de SuDS de Celdas de Bioretención.

#### **Figura 48**

*Propuesta de SuDS en zona de estudio Cerro La Picota*

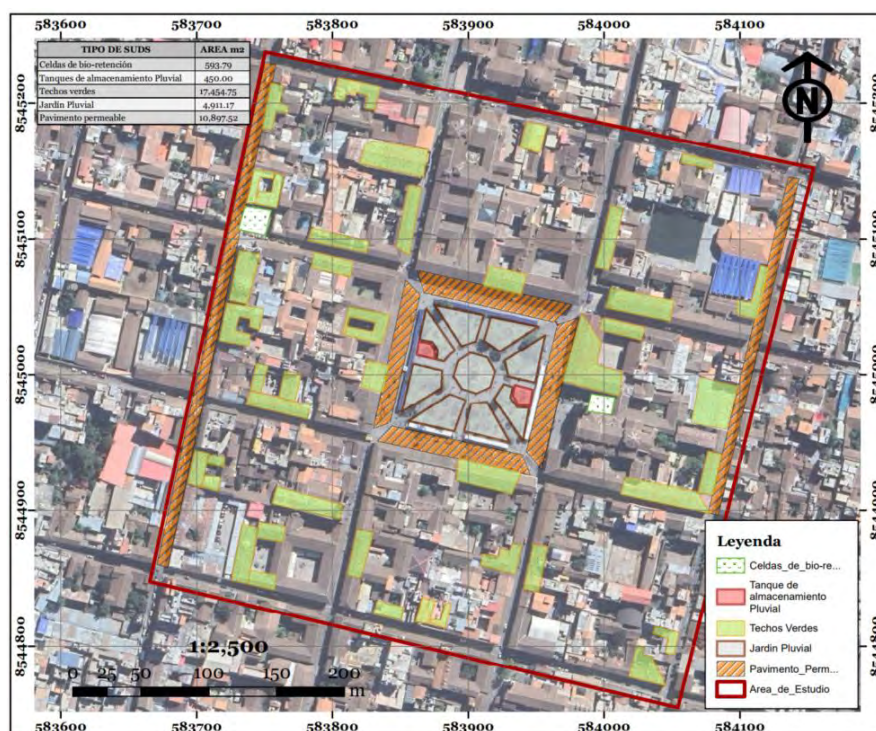


### 3.9.2 Propuesta de SuDS en Plaza Mayor de Huamanga

La zona de estudio correspondiente a la Plaza Mayor de Huamanga presenta restricciones de espacio vial, además de que una parte de estas conducen el sistema de drenaje actual, por lo que se plantearon SuDS de pavimento permeable en las vías que no cuentan con un sistema de drenaje pluvial. Respecto a las edificaciones, se identificaron aquellos espacios con áreas más grandes para el uso de SuDS de Techo Verde. Asimismo, se identificaron los espacios públicos en los cuales se puede implementar jardines de bio-retención, los cuales son espacios en los que no se cuenta con vegetación actualmente. Por su parte, las áreas de la Plaza Mayor de Huamanga, se han modelado como jardín pluvial, debido a que es la función que desempeñan dentro de las alternativas de SuDS. Por último, debido a la disposición de espacio suficiente dentro del parque se consideraron dos secciones en las que se diseñara el SuDS de tipo almacenamiento pluvial o tanques de almacenamiento pluvial.

Figura 49

Propuesta de SuDS en zona de estudio Plaza Mayor de Huamanga



### 3.9.3 Parámetros de diseño de SuDS en SWMM

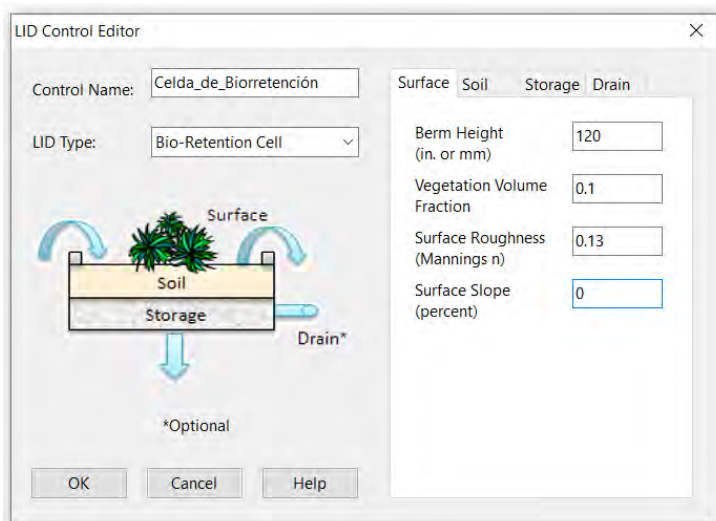
Los valores usados para el diseño, son mencionados en acápite 2.7. **Valores típicos para diseño de SuDS** de la presente investigación.

#### 3.9.3.1 Celdas de bio-retención

Las celdas de bio retención usadas en el modelado de SWMM, utilizan los valores típicos recomendados según el Manual de Referencia para la Gestión de Tormentas (Rossman & Huber, 2016). Por lo que, se ha considerado, que las celdas de bio-retención, en primer lugar, no estarán conectadas a la red de desagüe con el fin de retener parte del volumen de agua de la tormenta. En ese sentido, los parámetros considerados, constan de tres capas, cuyos parámetros específicos se definieron de la siguiente manera. Primero, la capa superficial consta de una altura libre igual a 120mm (menor a 6", como se recomienda), un volumen verde de 0.1, un coeficiente de Manning igual a 0.13, y sin pendiente.

**Figura 50**

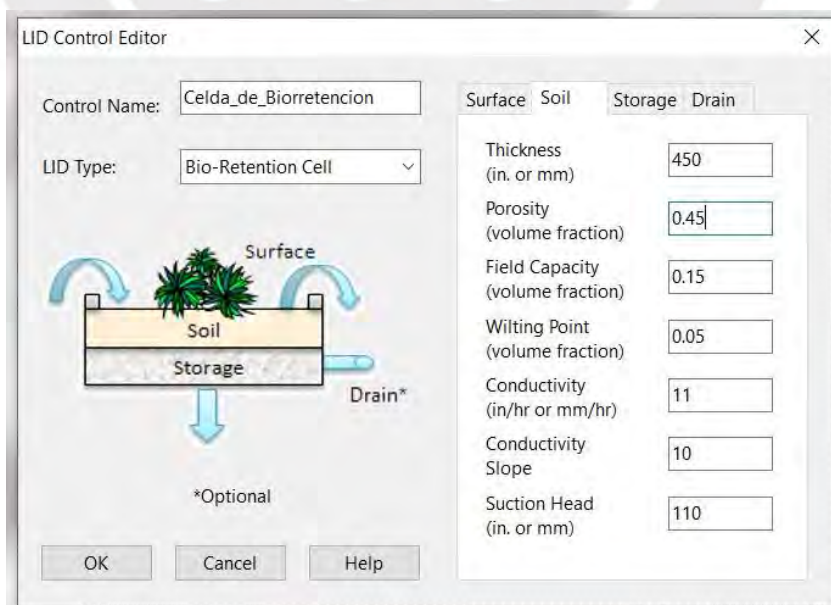
*Parámetros de superficie de celda de bioretención*



Por otro lado, la capa correspondiente al suelo consta de un espesor igual a 600mm, porosidad igual a 0.45, capacidad de campo igual a 0.15, punto de marchitamiento igual 0.05, conductividad saturada igual a 11mm/hr; pendiente de conductividad igual a 10; y, succión frontal iguala 110mm.

**Figura 51**

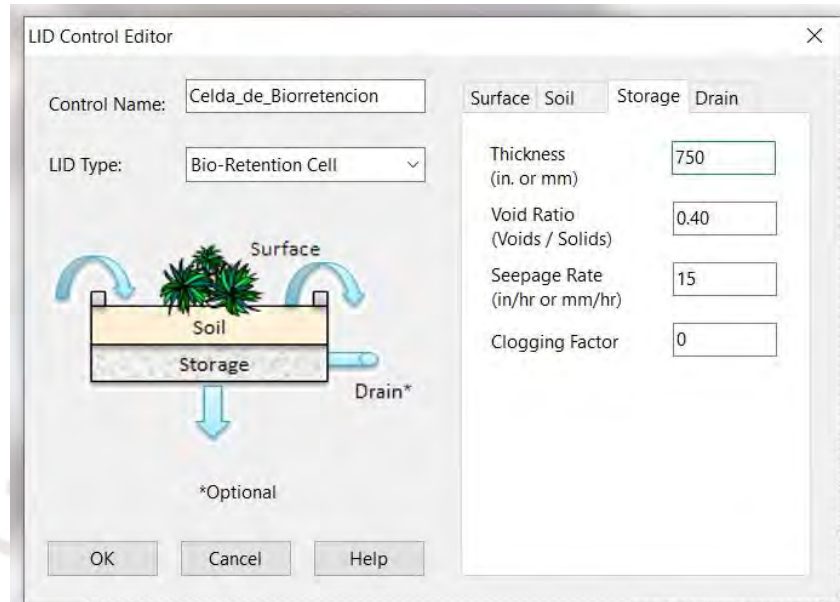
*Parámetros de suelo de celda de bioretención*



Por último, la capa de almacenamiento fue modelada con un espesor de 750 mm, una fracción de vacíos igual a 0.40; y, un valor de relación de infiltración igual a 15 mm/hr.

**Figura 52**

*Parámetros de almacenamiento de celda de bioretención*

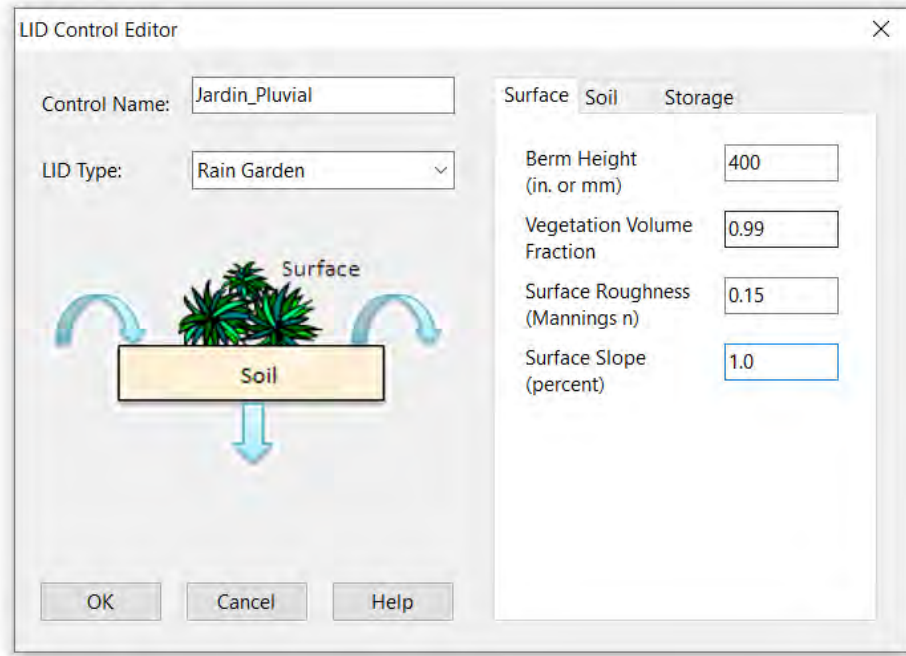


### 3.9.3.2 Jardín Pluvial

Para el caso del jardín pluvial ubicado en la Plaza Mayor de Ayacucho se consideraron los siguientes parámetros para las dos capas de suelo que lo conforman. La primera, una altura de berma igual a 400mm, un fracción de volumen vegetativo igual a 0.99, un coeficiente de rugosidad igual a 0.15; y, una pendiente igual a 1%. (Escobar Ruiz, 2021)

**Figura 53**

*Parámetros de superficie de celda de jardín pluvial*



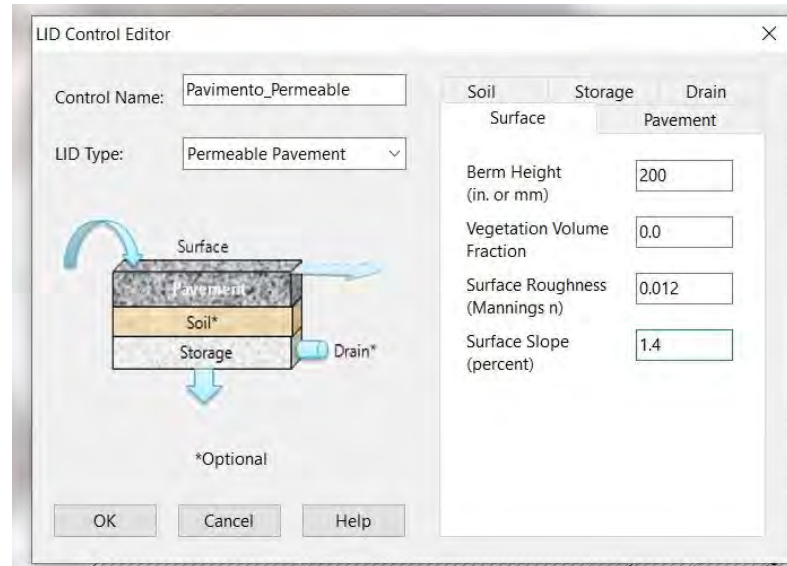
Respecto a la capa de suelo se ha considerado, las mismas propiedades de las celdas de bio-retención.

### 3.9.3.3 Pavimento permeable

Se consideraron los valores típicos para el diseño de pavimentos además de que las propiedades del pavimento permeable fueron tomadas del trabajo de Diseño de Pavimento Rígido Permeable para la evacuación de aguas pluviales según la norma ACI 552R-10 (Bautista Pereda, 2018). En ese sentido, la altura de la berma es igual a 200mm, sin presencia de áreas verdes, un coeficiente de rozamiento igual a 0.0012, y una pendiente igual a 1.40%.

#### Figura 54

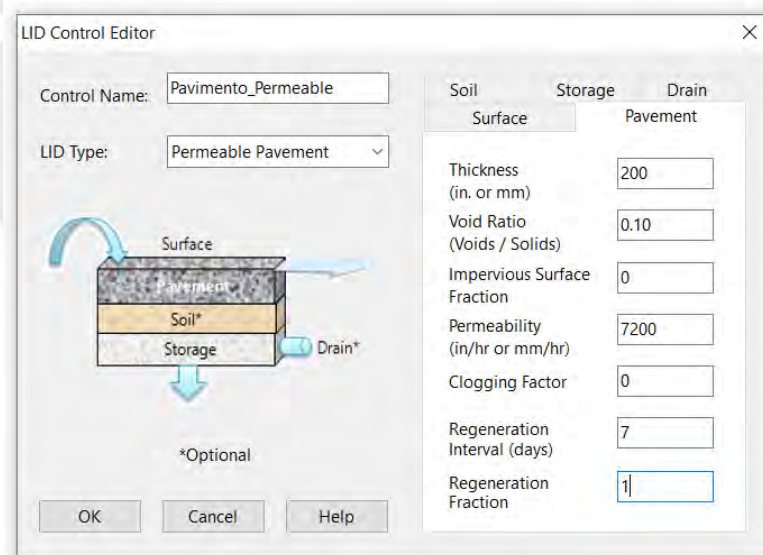
*Parámetros de superficie de pavimento permeable*



El pavimento se modeló con un espesor de capa igual a 200mm, con un porcentaje de vacíos igual a 0.10, una permeabilidad del material igual a 7200mm por hora; un periodo de regeneración en días del pavimento igual a 7, y un valor de regeneración igual a 1.

**Figura 55**

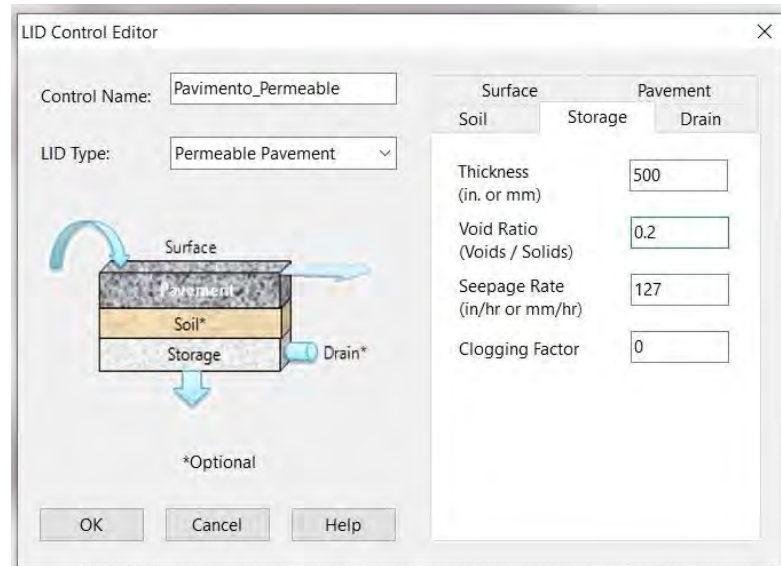
*Parámetros de pavimento del pavimento permeable*



Respecto, a la capa de almacenamiento, se consideró una altura igual a 500mm, con un ratio de vacíos igual a 0.20, y una relación de filtración igual a 127mm/hr.

**Figura 56**

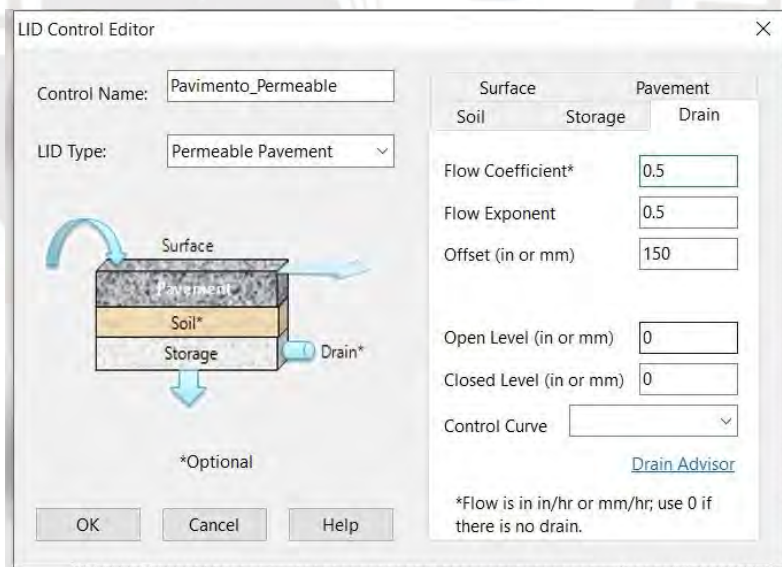
*Parámetros de depósito del pavimento permeable*



Respecto a los parámetros de drenaje, se considerará un coeficiente de flujo igual a 0.50, con un exponente de flujo a 0.50, y una altura del dren igual a 150mm, valores que se estiman para un tiempo de drenado igual a 48 horas. (Caicedo Padilla, 2020)

**Figura 57**

*Parámetros de drenaje del pavimento permeable*



#### 3.9.3.4 Tanque de almacenamiento pluvial

La capacidad de los tanques de almacenamiento ha sido calculada según el área sobre la cual estas se encuentran inscritas, esta corresponde al Área 21 de la Tabla 2, con un área total de 33,277.82 m<sup>2</sup>. Sin embargo, el área en referencia no es cubierta en la totalidad por el

área tributaria de los tanques. La cual se estimó como un 50% de la superficie en referencia (16,638.91 m<sup>2</sup>), es decir cada uno de los caudales, se diseñará para un área igual a la mitad de este valor (8,319.46 m<sup>2</sup>). De esta manera, se obtiene el volumen de retención, según el método racional y mediante los siguientes parámetros:

**Tabla 16**

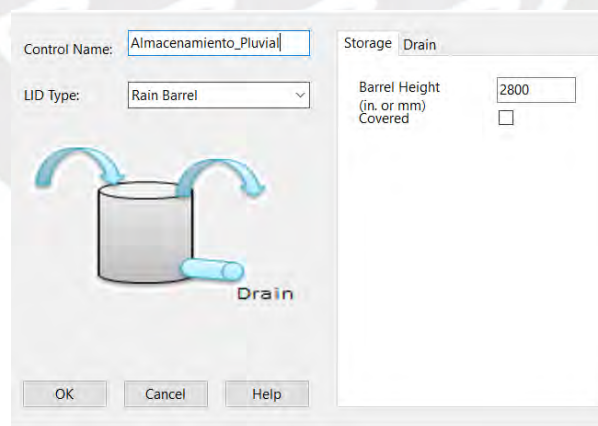
*Estimación de volumen de almacenamiento de tanque pluvial*

Parámetro	Valor
At (m2)	8319.46
C	0.90
I (mm/hr)	82.49
t (hr)	1.00
Vmax (m3)	617.64

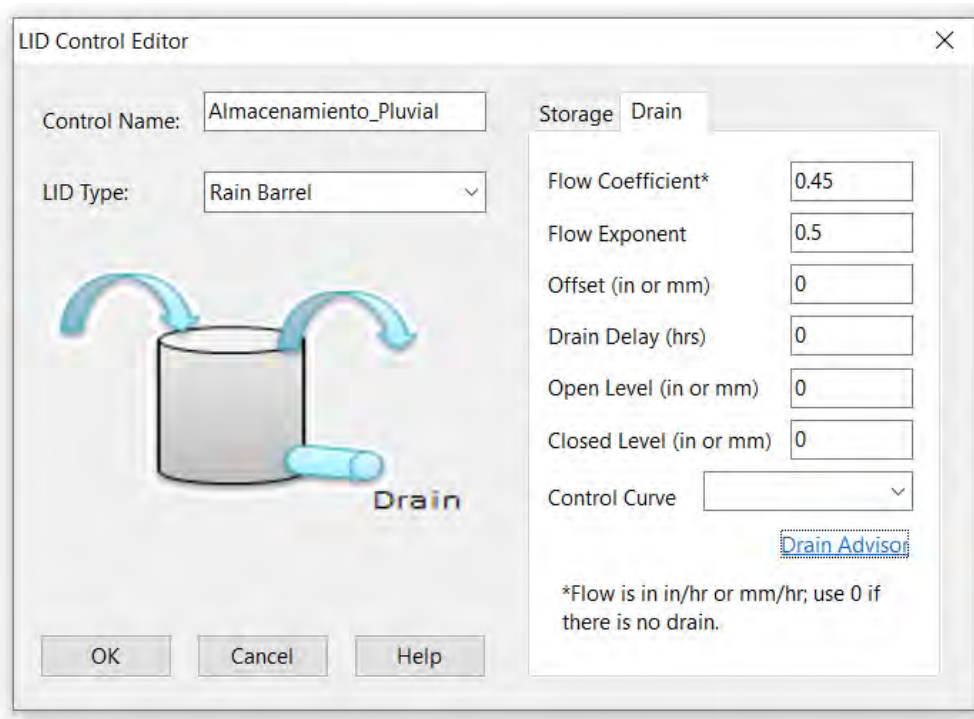
En ese sentido, cada uno de barriles pluviales fue diseñado según el Vmax mostrado, para lo cual se consideraron secciones prismáticas de una altura de 2.80m por 15 metros de largo y de ancho, resultando en un volumen neto de 630.00m<sup>3</sup>.

**Figura 58**

*Parámetros de almacenamiento del tanque pluvial*



Respecto a los parámetros de drenaje se consideró que no existe drenaje hacia las redes de desagüe pluvial, y que el tiempo que toma a este volumen en drenar es igual a 48 horas, por lo que los parámetros estimados de esta manera para el coeficiente de flujo son igual a 0.45 y el exponente del flujo igual a 0.5. (Palla & Gnecco, 2015)

**Figura 59***Parámetros de drenaje del tanque pluvial*


LID Control Editor

Control Name: Almacenamiento\_Pluvial

LID Type: Rain Barrel

Storage Drain

Flow Coefficient\* 0.45

Flow Exponent 0.5

Offset (in or mm) 0

Drain Delay (hrs) 0

Open Level (in or mm) 0

Closed Level (in or mm) 0

Control Curve

Drain Adviso

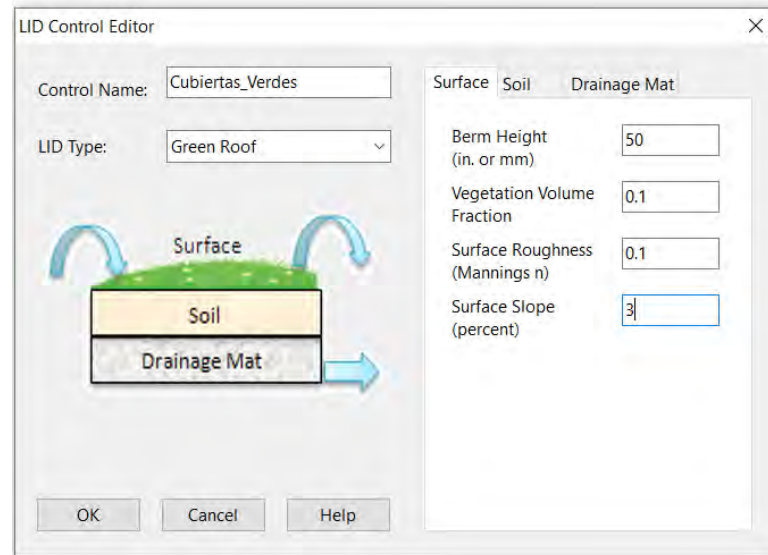
\*Flow is in in/hr or mm/hr; use 0 if there is no drain.

OK Cancel Help

### 3.9.3.5 Techos verdes

Los techos verdes se modelaron con los parámetros recomendados por el Manual de diseño de SuDS (Kellagher et al., 2015). En ese sentido, la capa correspondiente a la superficie contempla una altura de berma igual a 50mm, con un porcentaje de vegetación igual a 0.10, coeficiente de rigidez igual a 0.10; y, una pendiente igual a 3%.

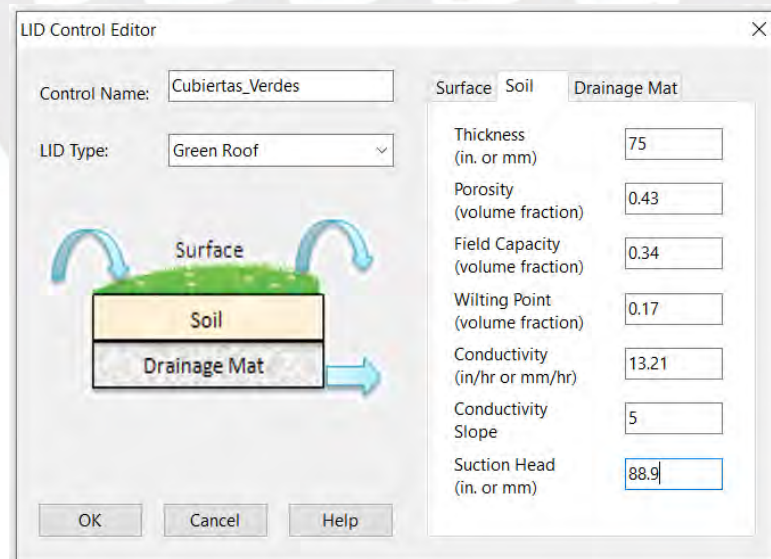
**Figura 60***Parámetros de superficie de la cubierta verde*



Respecto a la capa de suelo, se consideró un espesor de 75mm, con una porosidad del suelo igual a 0.43, una capacidad de campo igual a 0.34, un punto de marchitez igual a 0.17, conductividad saturada igual a 13.21 mm/hr, pendiente de conductividad igual a 5, y succión superior igual a 88.9 mm.

### Figura 61

*Parámetros de suelo de la cubierta verde*



Por último, respecto a la capa drenante, se consideró un espesor de 25mm, con un ratio de vacíos igual a 0.70, y una rugosidad igual a 0.30.

**Figura 62**

*Parámetros de material drenante de la cubierta verde*

LID Control Editor

Control Name:

LID Type:

Surface Soil Drainage Mat

Thickness (in. or mm)

Void Fraction

Roughness (Mannings n)

OK Cancel Help

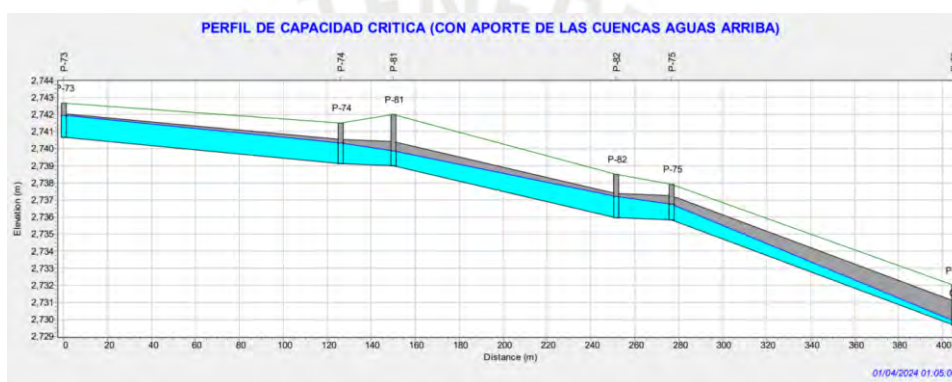


drenaje pluvial existente en los dos primeros tramos no cumple con la sugerencia de la norma. Dando a entender que estos puntos el diseño está mal planteado.

Sin embargo, como se puede observar a continuación, en la Figura 65, el nivel de reducción de la capacidad del canal que cumplen los SuDS frente al caso en el que no se implementan en la cuenca urbana (Figura 64) se podría considerar como despreciable, ya que no hay cambios significativos de la reducción de la capacidad.

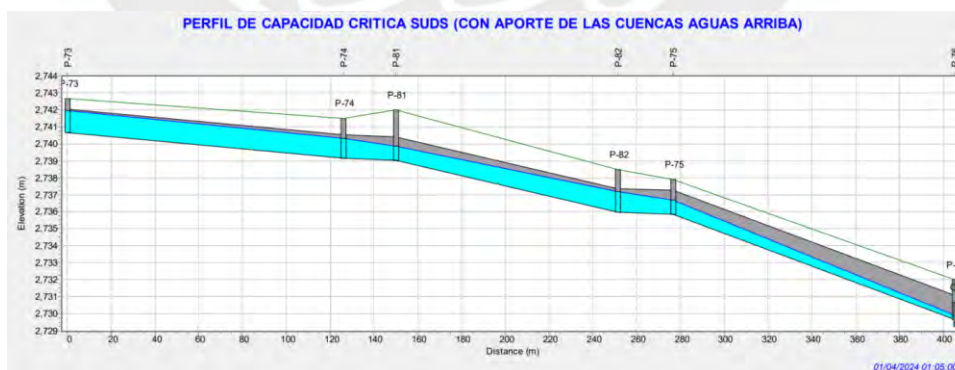
**Figura 64**

*Capacidad crítica del perfil con caudal de aporte sin implementación de SuDS*



**Figura 65**

*Capacidad crítica del perfil con caudal de aporte con implementación de SuDS*



Esto se puede explicar en relación al caudal de aporte a la cuenca delimitada, ya que este se considera como un afluente masivo en el cual no se puede observar la interacción con

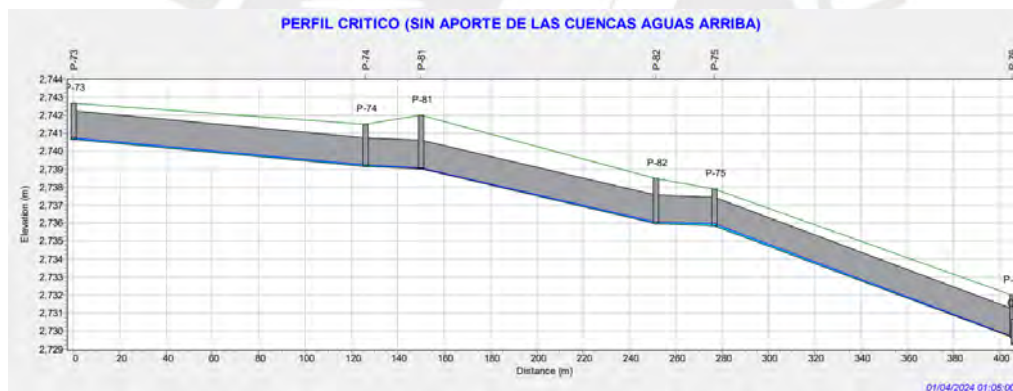
los SuDS, lo cual sería posible solo para el caso en el que toda el área de la cuenca implemente en su extensión los SuDS. Por esto, con la finalidad de tener una comprensión del aporte de los SuDS frente a casos de máximas avenidas, es necesario considerar el caso aislado sin caudales afluentes a la cuenca.

#### 4.1.2 Caso 3 y 4: simulación sin caudales de aporte sin SuDS/ con SuDS

Estos casos demostraron que el diseño del drenaje pluvial no llega a su máxima capacidad en el perfil crítico cuando no existen caudales afluentes, como se muestra a continuación:

**Figura 66**

*Capacidad crítica del perfil sin caudal de aporte sin implementación de SuDS*



**Figura 67**

*Capacidad crítica del perfil sin caudal de aporte con implementación de SuDS*



Sin embargo, la utilidad de este análisis se explica cuando se analiza la afluencia de caudales en los puntos de control de salida, cuyos cambios son más significativos para el caso de la cuenca aislada. Estos puntos, así como el caudal máximo de afluencia, fueron extraídos de la simulación en SWMM y se muestran a continuación:

**Figura 68**

*Afluencia de puntos de control de salida, sin SuDS (izquierda), con SuDS (derecha)*

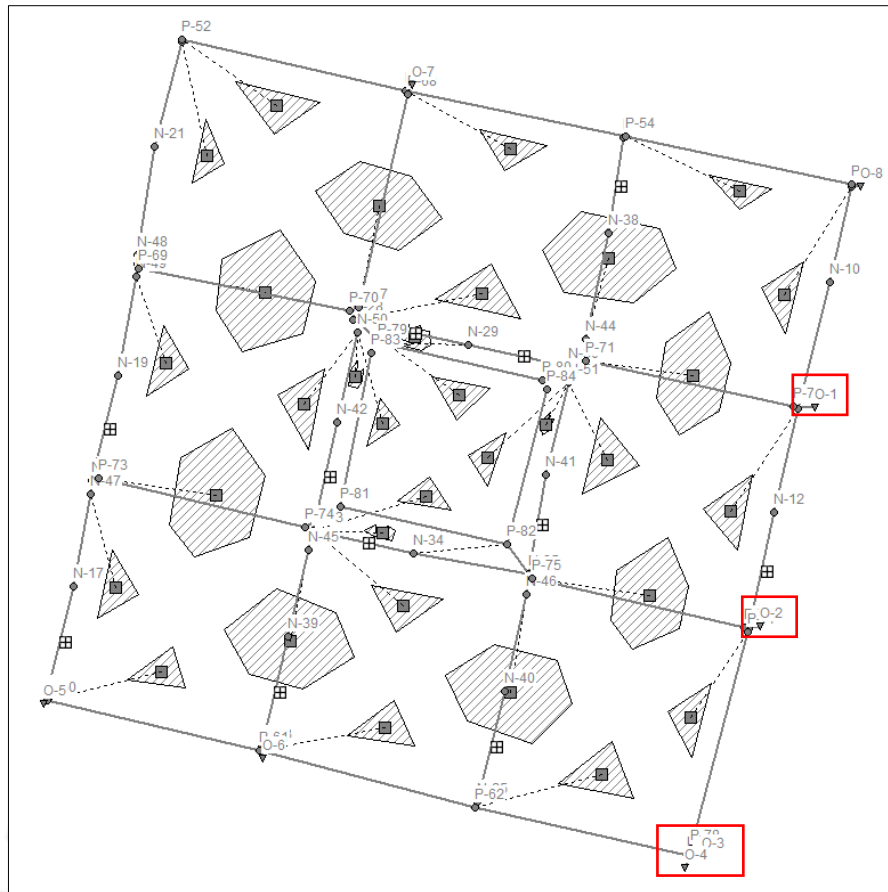
Node	Type	Maximum Lateral Inflow LPS	Maximum Total Inflow LPS
P-78	JUNCTION	0.00	85.15
P-79	JUNCTION	14.37	103.12
P-80	JUNCTION	37.51	127.17
P-81	JUNCTION	12.13	101.35
P-82	JUNCTION	6.79	106.48
P-83	JUNCTION	0.00	0.00
P-84	JUNCTION	0.00	0.00
O-1	OUTFALL	0.00	180.86
O-2	OUTFALL	0.00	252.32
O-3	OUTFALL	0.00	183.42
O-4	OUTFALL	0.00	75.37
O-5	OUTFALL	0.00	0.03
O-6	OUTFALL	0.00	0.00
O-7	OUTFALL	0.00	88.96
O-8	OUTFALL	0.00	122.51

Node	Type	Maximum Lateral Inflow LPS	Maximum Total Inflow LPS
P-78	JUNCTION	0.00	61.47
P-79	JUNCTION	5.45	87.90
P-80	JUNCTION	9.40	89.37
P-81	JUNCTION	4.30	41.07
P-82	JUNCTION	2.87	42.76
P-83	JUNCTION	0.00	0.00
P-84	JUNCTION	0.00	0.00
O-1	OUTFALL	0.00	141.97
O-2	OUTFALL	0.00	121.25
O-3	OUTFALL	0.00	151.39
O-4	OUTFALL	0.00	42.29
O-5	OUTFALL	0.00	0.02
O-6	OUTFALL	0.00	0.00
O-7	OUTFALL	0.00	78.44
O-8	OUTFALL	0.00	113.88

**Figura 69**

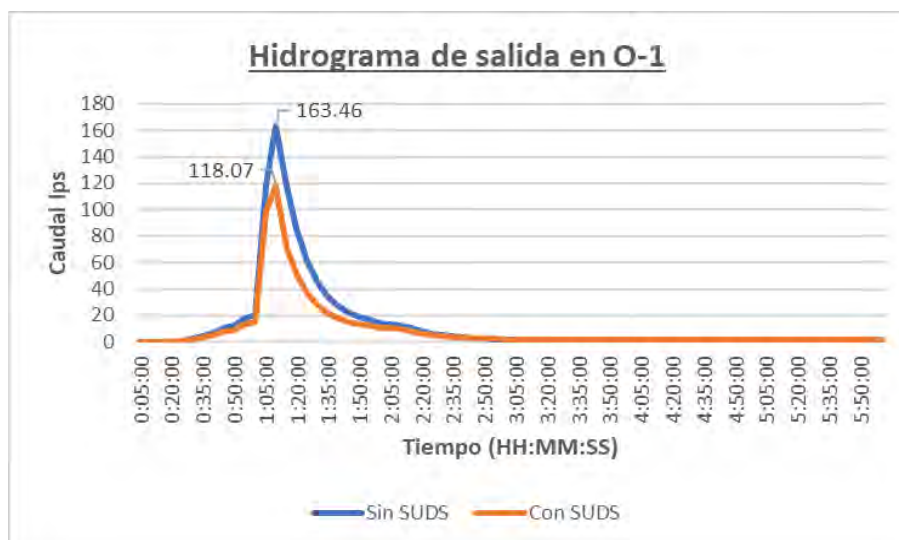
*Ubicación de puntos de control de salida críticos*



Respecto al punto de control O-1, se verificó la influencia de los SuDS planteados al observar un cambio del caudal máximo total de 180.86 lps a 141.97 lps, con una disminución del 21.50% respecto al caudal máximo. Por otra parte, como se observa en la Figura 67, el caudal se ha visto reducido a lo largo de la duración de la tormenta, y, además, para tiempos posteriores existen puntos en los cuales el caudal del caso que implementa SuDS es mayor, esto se explica desde la propiedad de retención de volumen de agua en los SuDS que en tiempos posteriores a la tormenta escurren hacia el punto de control en referencia.

### Figura 70

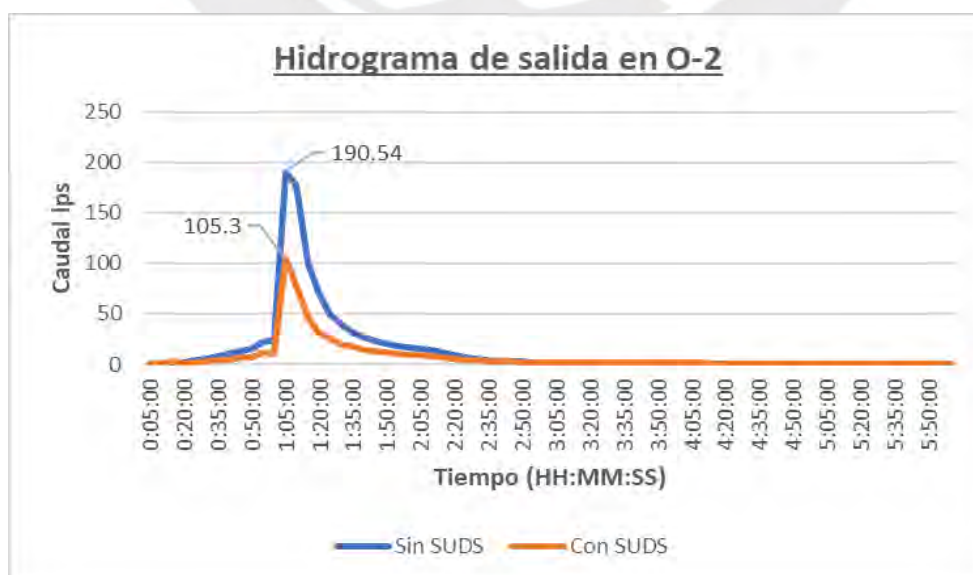
*Comparación de hidrogramas de salida del punto de control O-1*



Respecto al punto de control O-2, se verificó la influencia de los SuDS planteados al observar un cambio del caudal máximo total de 252.32 lps a 121.25 lps, con una disminución del 51.95% respecto al caudal máximo. Por otra parte, como se observa en la Figura 68, el caudal se ha visto reducido a lo largo de la duración de la tormenta, con algunas horas en las que el hidrograma de la cuenca que implemente SuDS supera al otro, debido a la retención del caudal que los SuDS aportan.

**Figura 71**

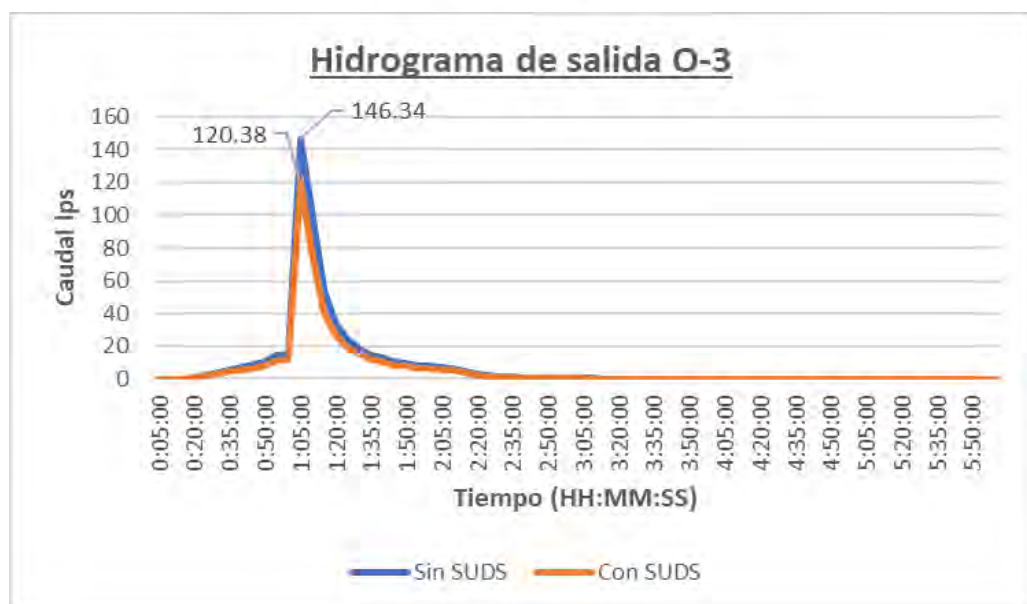
*Comparación de hidrogramas de salida del punto de control O-2*



Respecto al punto de control O-3, se verificó la influencia de los SuDS planteados al observar un cambio del caudal máximo total de 183.42 lps a 151.39 lps, con una disminución del 17.46% respecto al caudal máximo. Por otra parte, como se observa en la Figura 69, el hidrograma de la cuenca que implemente SuDS se reduce a lo largo de la duración de la tormenta respecto al otro caso.

### Figura 72

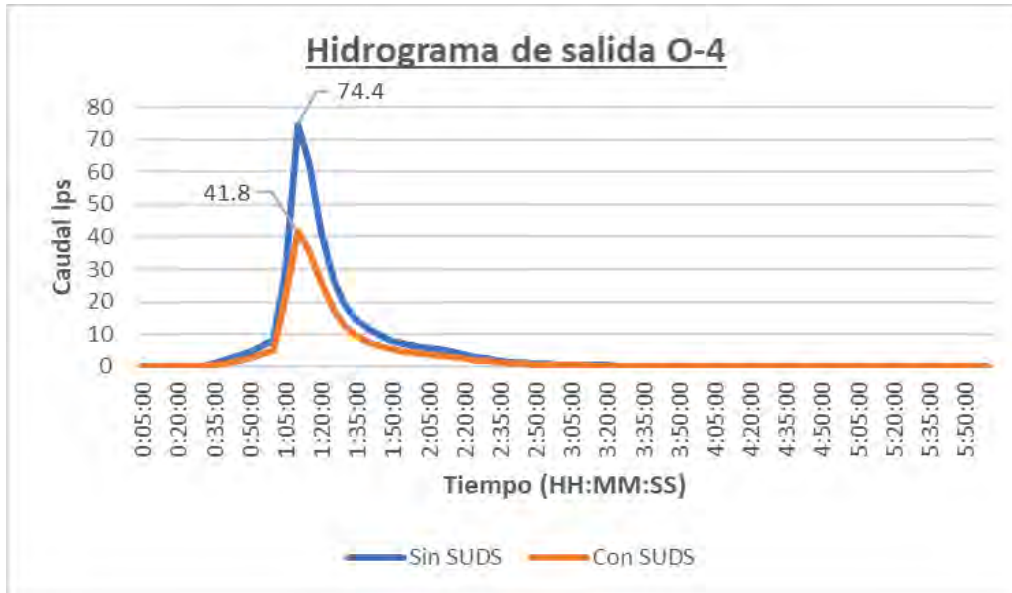
*Comparación de hidrogramas de salida del punto de control O-3*



Por último, respecto al punto de control O-4, se verificó la influencia de los SuDS planteados al observar un cambio del caudal máximo total de 75.37 lps a 42.29 lps, con una disminución del 43.89% respecto al caudal máximo. Por otra parte, como se observa en la Figura 70, el hidrograma de la cuenca que implemente SuDS se reduce durante y después de la tormenta respecto al otro caso.

### Figura 73

*Comparación de hidrogramas de salida del punto de control O-4*



## 4.2 Caso de Cerro La Picota

### 4.2.1 Caso 1 y 2: simulación con caudales de aporte sin SuDS/ con SuDS

Para poder tener un mejor panorama de la simulación cuando existen caudales de aporte a la cuenca urbana se analizó el mapa de máximas capacidades del drenaje existente. Este análisis permitió ubicar el perfil cuyo comportamiento es crítico ante el evento simulado de una tormenta con tiempo de retorno de 50 años, el cual se muestra a continuación:

**Figura 74**

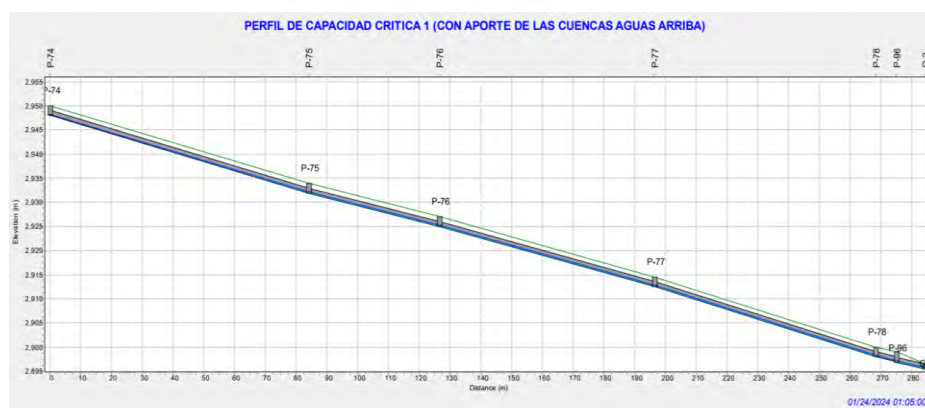
*Ubicación de perfil crítico de la cuenca urbana*



Según la Norma CE.040 Drenaje Pluvial (2021), se espera que la capacidad máxima no exceda el 80% de la capacidad máxima, por lo que se puede observar que el diseño cumple con la sugerencia de la norma. Sin embargo, el porcentaje de reducción de la capacidad crítica que cumplen los SuDS frente al caso en el que no se implementan en la cuenca urbana se podría considerar como despreciable.

**Figura 75**

*Capacidad crítica del perfil 01 con caudal de aporte sin implementación de SuDS*



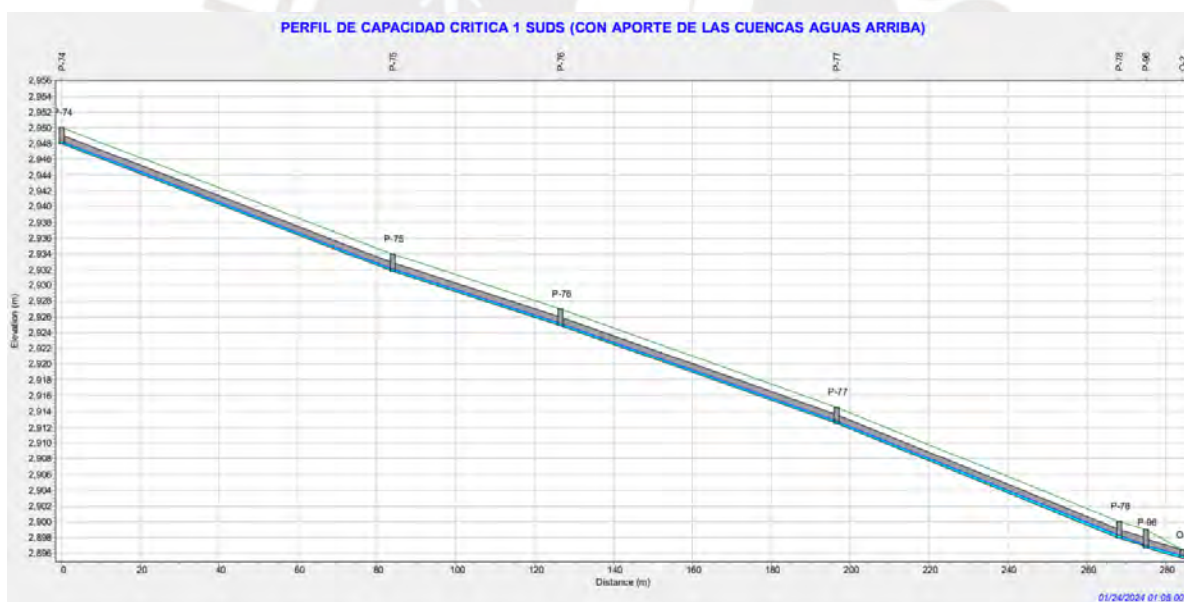
**Figura 76**

*Capacidad crítica del perfil 02 con caudal de aporte sin implementación de SuDS*



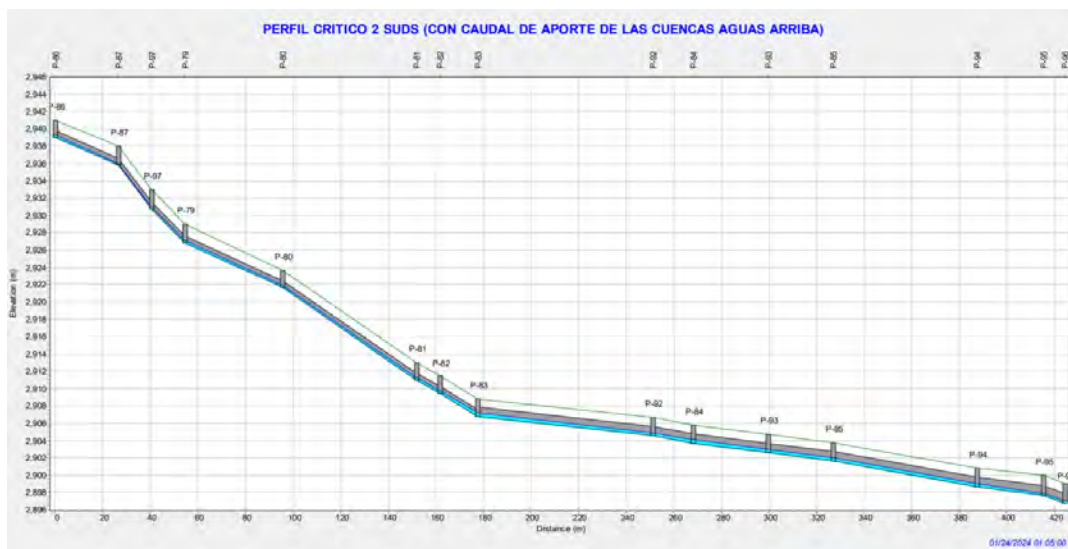
**Figura 77**

*Capacidad crítica del perfil 01 con caudal de aporte con implementación de SuDS*



**Figura 78**

*Capacidad crítica del perfil 02 con caudal de aporte con implementación de SuDS*



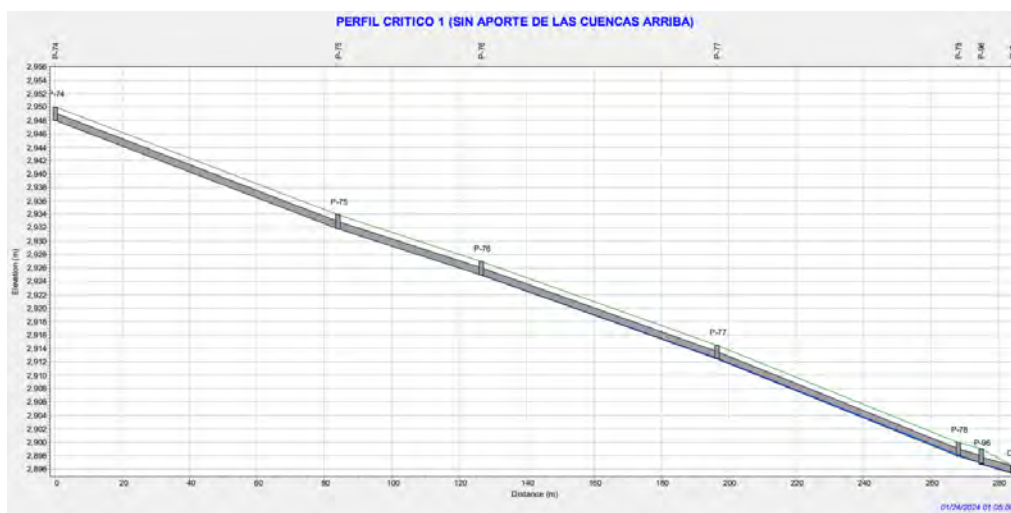
Esto se puede explicar en función a la relación de áreas entre la cuenca delimitada respecto al área total que aporta el caudal afluente a esta. Por esto, es necesario tener una comprensión del aporte de los SuDS frente a casos de máximas avenidas, por lo cual se consideró el caso aislado, es decir aquel en el cual no existen caudales afluentes a la cuenca.

#### 4.2.2 Caso 3 y 4: simulación sin caudales de aporte sin SuDS/ con SuDS

Estos casos demostraron que el diseño del drenaje pluvial no llega a su máxima capacidad en el perfil crítico cuando no existen caudales afluentes, como se muestra a continuación:

#### Figura 79

*Capacidad crítica del perfil 01 sin caudal de aporte sin implementación de SuDS*



**Figura 80**

*Capacidad crítica del perfil 02 sin caudal de aporte sin implementación de SuDS*



**Figura 81**

*Capacidad crítica del perfil 01 sin caudal de aporte con implementación de SuDS*



**Figura 82**

*Capacidad crítica del perfil 02 sin caudal de aporte con implementación de SuDS*



Sin embargo, la utilidad de este análisis se explica cuando se analiza la afluencia de caudales en los puntos de control de salida, cuyos cambios son más significativos para el caso de la cuenca aislada. Estos puntos, así como el caudal máximo de afluencia, fueron extraídos de la simulación en SWMM y se muestran a continuación:

Figura 83

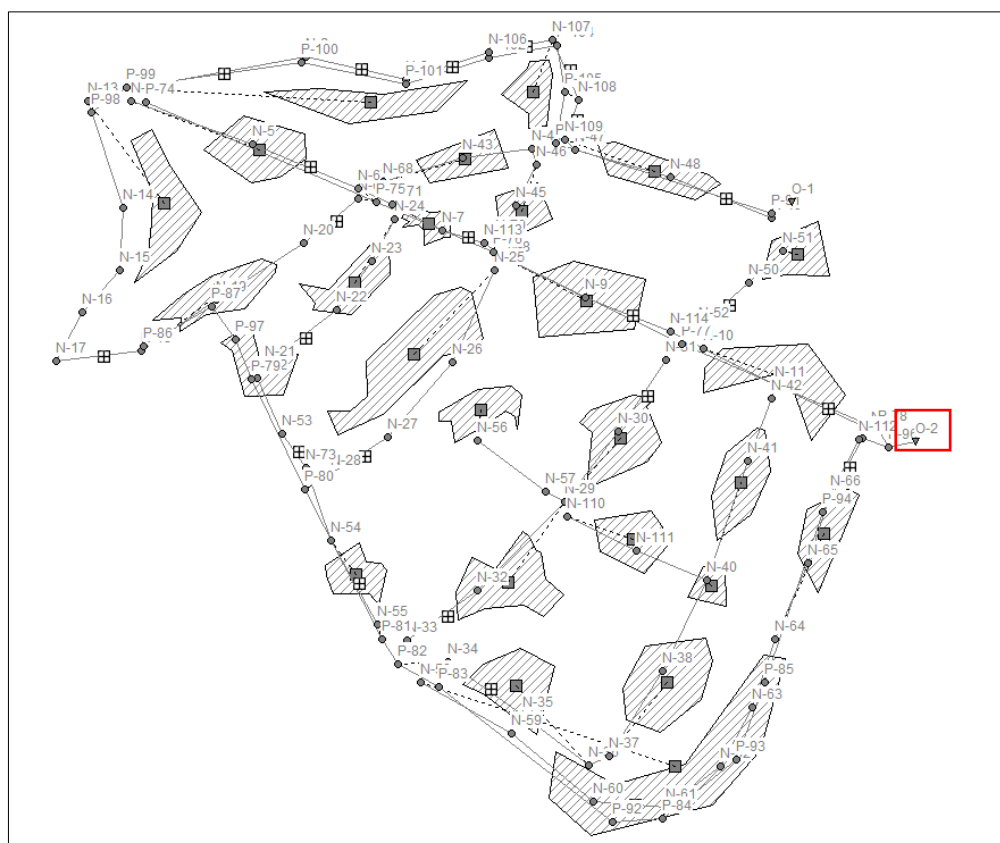
*Afluencia de puntos de control de salida, sin SuDS (izquierda), con SuDS (derecha)*

Node	Type	Maximum Lateral Inflow LPS	Maximum Total Inflow LPS
P-86	JUNCTION	17.70	17.70
P-87	JUNCTION	0.00	17.69
P-90	JUNCTION	8.08	29.80
P-91	JUNCTION	15.34	44.29
P-92	JUNCTION	0.00	129.22
P-93	JUNCTION	0.00	148.73
P-94	JUNCTION	0.00	147.91
P-95	JUNCTION	8.45	154.16
P-96	JUNCTION	0.00	356.05
P-97	JUNCTION	0.00	17.67
P-98	JUNCTION	0.00	0.00
P-99	JUNCTION	0.00	0.00
P-100	JUNCTION	16.97	16.97
P-101	JUNCTION	0.03	16.67
P-102	JUNCTION	0.00	16.28
P-104	JUNCTION	0.00	15.89
P-105	JUNCTION	8.16	22.55
N-106	JUNCTION	0.00	0.01
N-107	JUNCTION	8.64	8.64
N-108	JUNCTION	-8.16	8.74
N-109	JUNCTION	9.66	16.76
N-110	JUNCTION	12.27	12.27
N-111	JUNCTION	0.00	12.04
N-112	JUNCTION	-8.45	8.45
N-113	JUNCTION	-9.64	9.64
N-114	JUNCTION	-27.58	27.58
O-1	OUTFALL	0.00	44.24
O-2	OUTFALL	0.00	356.06

Node	Type	Maximum Lateral Inflow LPS	Maximum Total Inflow LPS
P-86	JUNCTION	7.01	7.01
P-87	JUNCTION	0.00	7.00
P-90	JUNCTION	6.22	25.97
P-91	JUNCTION	14.24	39.26
P-92	JUNCTION	0.00	88.85
P-93	JUNCTION	0.00	106.77
P-94	JUNCTION	0.00	106.01
P-95	JUNCTION	7.31	111.25
P-96	JUNCTION	0.00	261.92
P-97	JUNCTION	0.00	7.00
P-98	JUNCTION	0.00	0.00
P-99	JUNCTION	0.00	0.00
P-100	JUNCTION	15.86	15.86
P-101	JUNCTION	0.04	15.56
P-102	JUNCTION	0.00	15.19
P-104	JUNCTION	0.00	14.82
P-105	JUNCTION	6.95	20.40
N-106	JUNCTION	0.00	0.01
N-107	JUNCTION	7.35	7.35
N-108	JUNCTION	-6.95	7.47
N-109	JUNCTION	10.20	15.58
N-110	JUNCTION	4.42	4.42
N-111	JUNCTION	0.00	4.31
N-112	JUNCTION	-7.31	7.30
N-113	JUNCTION	-8.60	8.60
N-114	JUNCTION	-25.86	25.86
O-1	OUTFALL	0.00	39.22
O-2	OUTFALL	0.00	261.93

## Figura 84

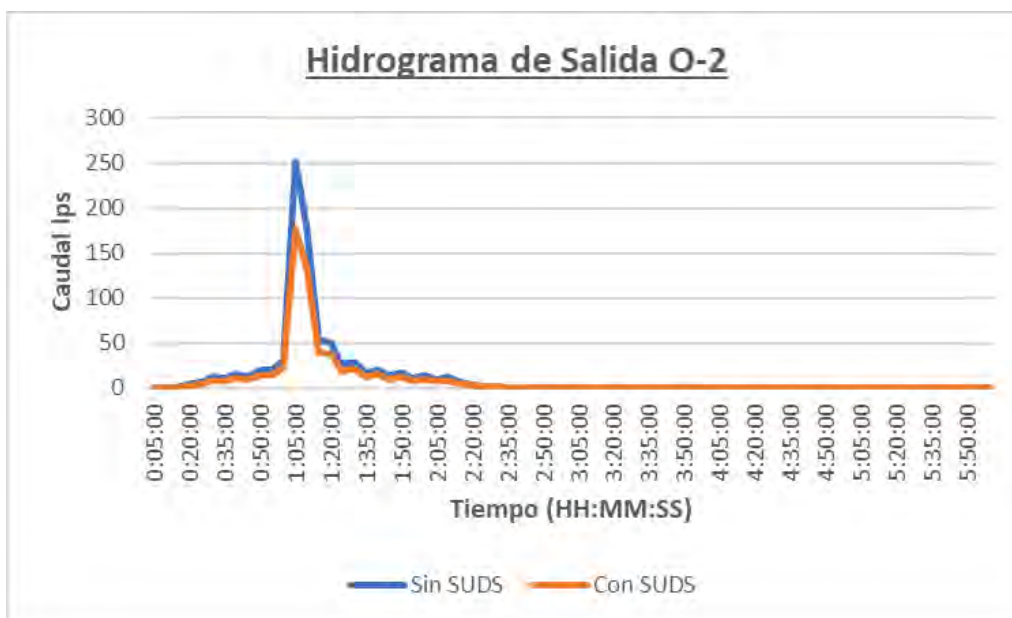
*Ubicación de puntos de control de salida críticos*



Respecto al punto de control O-2, se verificó la influencia de los SuDS planteados al observar un cambio del caudal máximo de 356.06 lps a 261.93 lps, con una disminución del 26.44% respecto al caudal máximo. Por otra parte, como se observa en la Figura 82, el caudal se ha visto reducido a lo largo de la duración de la tormenta, y, además, para tiempos posteriores existen puntos en los cuales el caudal del caso que implementa SuDS es mayor, esto se explica desde la propiedad de retención de volumen de agua en los SuDS que en tiempos posteriores a la tormenta escurren hacia el punto de control en referencia.

## Figura 85

*Comparación de hidrogramas de salida del punto de control O-2*

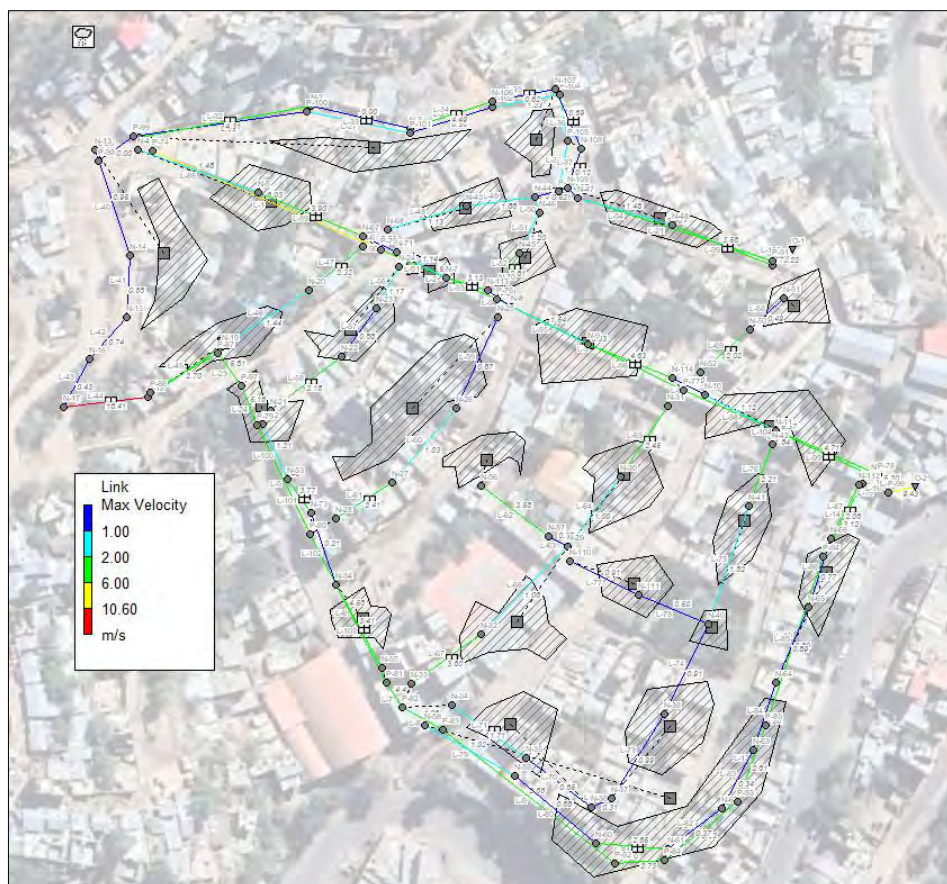


#### 4.2.3 Análisis de velocidades máximas

Por otro lado, según la Norma CE.040 Drenaje Pluvial (2021), la velocidad máxima debe estar en función al material a usar. Debido a las pendientes elevadas del terreno y por lo tanto velocidades altas, y en concordancia con los Criterios de diseño para diseño de obras hidráulicas (ANA, 2010) según se muestra en la Tabla 1, se requieren canales de hormigón de resistencia a la compresión no menores a 50 kg/cm<sup>2</sup>, el cual es un valor conservador, ya que permite diseñar hasta una velocidad máxima de 10.6m/s, siendo las velocidades máxima en el modelo de 9.43m/s. y 18.41 m/s. Respecto a esta última, en la sección en la cual se presenta se observó una estructura hidráulica existente de caídas verticales de concreto, con el fin de visualizar las velocidades máximas que alcanzaron los conductos según el modelo se muestra la Figura 86.

#### Figura 86

*Velocidades máximas en la zona de Cerro La Picota*



El análisis de la velocidad máxima es necesario porque permite verificar la compatibilidad entre el flujo generado en el sistema y la resistencia del material utilizado en el drenaje existente. Como se ha mencionado, velocidades elevadas pueden generar procesos de erosión si no se emplean materiales adecuados, y a su vez, velocidades demasiado bajas pueden favorecer la sedimentación.

En este estudio, se registraron velocidades significativas, las cuales se encuentra en el rango permisible de velocidades conforme a los criterios técnicos establecidos por la ANA (2010) y la Norma CE.040 Drenaje Pluvial (2021). Por tanto, el análisis de este parámetro garantiza un diseño hidráulico seguro y funcional.

## 5 Conclusiones y recomendaciones

### 5.1 Conclusiones

- Respecto a las condiciones geológicas de la zona se pudo ver que parte del área de caudal aportante de la zona de estudio del Cerro La Picota está compuesto de suelo arcillo con presencia de árboles y pendientes mayores a 50%. Por otra parte, se concluye el tiempo de retorno de diseño para el análisis de ambos casos fue igual a 50 años debido a las condiciones topográficas y la ocurrencia de huaicos, deslizamientos, y derrumbes registrados en años pasados. Debido a las condiciones de la cuenca urbana, los tiempos de concentración estimados fueron menores a 10 minutos por lo que se tomó en cuenta la intensidad de diseño igual a 65.42 mm/hr para un tiempo de concentración igual a 10 minutos.
- Si bien es cierto se realizó un trabajo topográfico para la simulación de la cuenca urbana, también fue necesario obtener los parámetros de diseño y dimensionamiento del drenaje urbano existente, ya que ambos fueron los parámetros iniciales más importantes durante el modelado de las zonas de estudio. Por otra parte, se adjuntó en el modelo el hietograma de diseño de una tormenta de 50 años de tiempo de retorno con una duración de 2 horas ya que para tiempos mayores el modelo arrojaba errores mayores a 5%, lo cual no es un valor recomendable según la teoría de Onda Dinámica. Respecto al modelamiento del drenaje pluvial, debido a la inaccesibilidad a la información de diseño específicamente sobre los tramos que están bajo la superficie, se verificó durante el modelado que los parámetros de los canales subterráneos cumplan con las sugerencias de la norma.
- Las condiciones presentadas por la ciudad de Ayacucho, de calles angostas, construcciones en laderas, y en general un crecimiento no planeado, no permitieron

el uso y/o aprovechamientos de la totalidad de alternativas de SuDS, por lo cual las técnicas que se aplicaron fueron evaluadas desde estas restricciones, siendo las que alternativas que si se usaron las siguientes: techos verdes, jardines pluviales, celdas de bioretención; pavimentos permeables, techos verdes, y tanques de almacenamiento pluvial.

- Se observó que las condiciones hidráulicas bajo las cuales trabaja el sistema actual de drenaje urbano propuesto y diseñado en base a las experiencias pasadas de desastres naturales cumplen con no exceder el 80% de su capacidad de sección, salvo un tramo ubicado en la Plaza Mayor de Huamanga. Asimismo, se pudo observar que existen zonas con presencia de altas velocidades en el Cerro La Picota, las cuales no sobrepasan los valores permisibles para el material propuesto.
- Se observó que las áreas modeladas como aisladas del entorno tuvieron una reducción muy alta del caudal que fluye por el drenaje pluvial, con reducciones de 17.46%, 21.50%, 43.89%, y 51.95% para la Plaza Mayor de Huamanga; y, de 26.44% para el Cerro La Picota. Sin embargo, cuando no se aislaron del entorno (se añadieron caudales de aporte a la cuenca urbana) se observó que no existían cambios significativos. Esto llevó a concluir que el uso de SuDS no debe ser exclusivo de una zona en específico en una cuenca urbana o ciudad, sino que debe de considerarse a los SuDS como un sistema integral que abarque a toda la ciudad o cuenca urbana.
- La sostenibilidad a largo plazo de los sistemas propuestos dependerá de la correcta implementación de normativa y un programa de mantenimiento periódico y de la incorporación de prácticas de gestión local. La educación ambiental, capacitación de personal y participación comunitaria también se perfilan como elementos clave para preservar su funcionalidad en el tiempo.

- Si bien la aplicación de técnicas de drenaje sostenible, conocidas como SuDS, demostró ser eficaz en la reducción de escorrentía superficial, su implementación enfrenta ciertos riesgos que deben ser considerados. Entre ellos destacan: la falta de normativa técnica local y personal calificado que respalde este tipo de soluciones, la posible resistencia por parte de la población ante intervenciones urbanas no convencionales, las interferencias con servicios públicos existentes, y la limitada disponibilidad de datos detallados para un diseño optimizado. Estos riesgos deben ser abordados en futuras etapas del proyecto a través de estudios complementarios, procesos de socialización comunitaria y coordinación interinstitucional.
- Otro riesgo relevante identificado en la aplicación de técnicas de drenaje sostenible es la acumulación de **sedimentos** en estructuras como zanjas de infiltración, pavimentos permeables y sistemas de bioretención. Esta acumulación puede reducir significativamente la eficiencia hidráulica y de infiltración del sistema si no se implementa un plan de operación y mantenimiento adecuado. Este riesgo se ve incrementado en zonas con suelos erosionables, alta pendiente o flujos cargados con partículas finas.
- Algunos componentes del sistema actual de drenaje pueden ser integrados como parte de una estrategia híbrida, teniendo en cuenta que el concepto de drenaje sostenible permite ampliar las capacidades y funcionalidades del drenaje convencional. Por ejemplo, las tuberías existentes pueden utilizarse como vías de conducción final (descarga), mientras que los captadores actuales pueden ser redirigidos hacia nuevas zonas de retención o infiltración. Esta estrategia de integración permite reducir costos y facilita la transición hacia un sistema de drenaje urbano sostenible.

- En el Perú, todavía no existe mucho desarrollo respecto a proyectos donde se apliquen técnicas de drenaje sostenible. Esta situación evidencia la necesidad de fomentar investigaciones que permitan explorar, de manera integral, los costos asociados al diseño, operación y mantenimiento. La poca información que se tiene al respecto radica en investigaciones de otros países más desarrollados en la implementación de estas técnicas de drenajes sostenibles como el Reino Unido y Estados Unidos y a nivel de Latinoamérica como Brasil y Colombia. En esta línea, se cita al ingeniero Alejandro Martínez, miembro fundador de la red SUDS de Bogotá y coordinador técnico de drenaje urbano en el Grupo TYPESA (Lima, Perú), donde indica lo siguiente: “Los costos relacionados a los SuDS dependerán del área geográfica, los recursos naturales locales, la economía local y el año de estimación de estos valores. Por esta razón, tomar como referencia precios indicativos resulta complejo ya que puede generar errores de cálculo que para grandes proyectos de inversión pública puede resultar un factor crítico para invertir o no en estas técnicas de drenaje sostenible.” (Martínez, 2024, VIII Jornada Internacional de la Red de SUDS, Bogotá).

## 5.2 Recomendaciones

- Para estudios de mayor detalle y mayor precisión se recomienda el levantamiento topográfico mediante drones, ya que de esta manera se puede analizar con mejor detalle el uso de suelos y la topografía actual presentes en una zona en específico. Asimismo, para el estudio hidrológico se recomienda usar información actual basada en estudios preexistentes los cuales se pueden encontrar en el Observatorio Nacional de Recursos Hídricos ONRH de la página web de la Autoridad Nacional del Agua.

- Se recomienda el uso de imágenes satelitales para la simulación en SWMM ya que el software requiere principalmente las cotas y longitudes del sistema de drenaje, sin que pueda colocarse de manera directa las coordenadas geográficas del sistema de drenaje pluvial.
- Se recomienda el análisis de esta situación desde un punto de vista sociopolítico ya que si bien es cierto se pueden plantear soluciones desde la ingeniería, la ocurrencia de fenómenos naturales con tiempos de retorno mayores a 50 años no ha sido contemplados en el diseño existente ni en la propuesta de la presente investigación. En ese sentido, se recomienda la elaboración de planes integrales de gestión que eduquen, prevean, y eviten que la población construya en zonas de riesgo.
- Se recomienda el uso de SuDS de manera íntegra al sistema de drenaje tradicional, y sobre todo que el uso de estos pueda realizarse en la totalidad del área correspondiente a la cuenca urbana o ciudad.
- Si bien esta investigación no desarrolla un análisis presupuestal detallado, se reconoce la importancia de considerar los costos de operación y mantenimiento asociados a las técnicas SuDS. Por ello, se recomienda realizar un estudio comparativo de costo-beneficio que permita evaluar de manera objetiva los costos reales de construcción, operación y mantenimiento de los SuDS, a fin de sustentar su viabilidad económica frente a las alternativas convencionales.
- Se recomienda que toda implementación de técnicas de drenaje sostenible SUDS vaya acompañada de un plan de operación y mantenimiento detallado, así como de campañas de sensibilización para garantizar su adecuada operación. Además, se sugiere la incorporación de indicadores de desempeño que permitan monitorear su eficiencia hidráulica y ambiental en el tiempo.

## 6 BIBLIOGRAFIA

- ANA. (2010). *Criterios de diseño de obras hidráulicas para la formulación de proyectos hidráulicos multisectoriales y de afianzamiento hídrico*. Autoridad Nacional del Agua. [http://www.ana.gob.pe/media/389716/manual-diseños-1.pdf?fbclid=IwAR3SRs91fBbuUi7EjKWn1xr6nMSpa5VUSF\\_JK1FnuaB7aQ3CD6FrYRlteYs](http://www.ana.gob.pe/media/389716/manual-diseños-1.pdf?fbclid=IwAR3SRs91fBbuUi7EjKWn1xr6nMSpa5VUSF_JK1FnuaB7aQ3CD6FrYRlteYs)
- Andina Agencia Peruana de Noticias. (2009, diciembre 16). Deslizamientos de lodo en Ayacucho dejan seis muertos y cuantiosos daños. *Andina Noticias*, 1–2.
- Aranda Campos, D. (1998). Procesos del ciclo hidrológico. En *Universidad Autónoma de San Luis Potosí*. Universidad Autónoma de San Luis Potosí. <https://bit.ly/3GOKZdS>
- Astete, F., & Bastante, J. (2020). Machu Picchu: maravilla de la ingeniería civil. En Dirección Desconcentrada de Cultura de Cusco (Ed.), *Machu Picchu Investigaciones Interdisciplinarias* (1° Edición, Vol. 1, p. 355). Ministerio de Cultura del Perú.
- Autoridad Nacional del Agua [ANA]. (2010). Estudio hidrológico y ubicación de la red de estaciones hidrométricas en la cuenca del río Rímac. *Ministerio de Agricultura Perú*, 226.
- Bautista Pereda, A. J. (2018). *Diseño de pavimento rígido permeable para la evacuación de aguas pluviales según la Norma ACI 522R-10* [Universidad San Martín de Porres]. <https://hdl.handle.net/20.500.12727/4928>
- Caicedo Padilla, A. (2020). *Modelación de dos sistemas urbanos de drenaje sostenible para la ciudad de Cali*. Universidad Nacional de Colombia.
- Chávez Céspedes, C. F., & Lara Camarena, S. B. (2020). *Estimación comparada del caudal ecológico en el río Chancay-Lambayeque con métodos de enfoque hidrológico y eco-hidráulico*. 112. <https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/16831>
- Chow, V. (2004). *Hidráulica de Canales Abiertos* (M. Suárez (ed.); 1° Edición). McGRAW-HILL.
- Davie, T., & Quinn, N. W. (2019). *Fundamental of Hydrology* (Routledge (ed.); 3° Edición). Routledge. [www.routledge.com/Routledge-Fundamentals-of-Physical-](http://www.routledge.com/Routledge-Fundamentals-of-Physical-)
- Defensa Civil Ayacucho. (2015). *Estimación de riesgo en Chaviña, Ayacucho*.

- Diario Correo. (2013, febrero 11). Lluvia deja serios daños en Huamanga. *Diario Correo*, 1–2.
- Escobar Ruiz, G. I. (2021). *Sistemas de Drenaje Urbano Sostenible*. Universidad de Alcalá.
- Fekete, A., Lechleuthner, A., Mudimu, O. A., Norf, C., Schremmer, U., & Stephan, C. (2017). Recovery after extreme events Lessons learned and remaining challenges in Disaster Risk Reduction. *Integrative Risk and Security Research*, 2(November), 1–115.
- Ferrans, P., Torres, M. N., Temprano, J., & Rodríguez Sánchez, J. P. (2022). Sustainable Urban Drainage System (SuDS) modeling supporting decision-making: A systematic quantitative review. *Science of the Total Environment*, 806, 150447. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150447>
- Fletcher, T. D., Shuster, W., Hunt, W. F., Ashley, R., Butler, D., Arthur, S., Trowsdale, S., Barraud, S., Semadeni-Davies, A., Bertrand-Krajewski, J. L., Mikkelsen, P. S., Rivard, G., Uhl, M., Dagenais, D., & Viklander, M. (2015). SuDS, LID, BMPs, WSUD and more – The evolution and application of terminology surrounding urban drainage. *Urban Water Journal*, 12(7), 525–542. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2014.916314>
- INDECI. (2023, abril). *Lluvias intensas en el departamento de Ayacucho*. 1–23.
- INEI, UNFPA, & INDECI. (2015). *Gestión de riegos de desastres* (Sergio Carrazco (ed.); 1º Edición). INEI.
- Joshi, P., Leitão, J. P., Maurer, M., & Bach, P. M. (2021). Not all SuDS are created equal: Impact of different approaches on combined sewer overflows. *Water Research*, 191, 116780. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116780>
- Kellagher, R., Martin, P., Jefferies, C., Bray, R., Shaffer, P., Wallingford, H. R., Woods-Ballard, B., Woods Ballard, B., Construction Industry Research and Information Association, Great Britain, Department of Trade and Industry, & Environment Agency. (2015). The SuDS manual. En CIRIA (Ed.), *CIRIA* (5º Edición). <http://www.persona.uk.com/A47postwick/deposit-docs/DD-181.pdf>
- Langbein, W. B., & Iseri, K. T. (1960). General Introduction end Hydrologic Definitions, Manual of Hydrology: Part 1. General Surface-Water Techniques. *Geological Survey Water-Supply Paper*, 1541-A, 33.
- Lavado, W., & Santos, D. (2014). *Modelamiento Hidrogeológico de la Cuenca Chancay -*

*Huaral: Aplicando el Modelo WEAP.*

<https://repositorio.senamhi.gob.pe/bitstream/handle/20.500.12542/942/Modelamiento-hidrologico-de-la-cuenca-Chancay-Huaral-aplicando-el-modelo-WEAP-2014.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Leon Nina, F. (2016). Estimación de riesgo en desastres en las quebradas de Santa Cecilia y Pilacucho del Barrio Santa Ana, Ayacucho, 2014. *Arqueología y Sociedad*, 32, 323–342.

CE.040 Drenaje Pluvial, Pub. L. No. RESOLUCIÓN MINISTERIAL N° 126-2021-VIVIENDA, Reglamento Nacional de Edificaciones 36 (2021).

<https://www.gob.pe/institucion/vivienda/informes-publicaciones/2309793-reglamento-nacional-de-edificaciones-rne>

Mónica, U. (2011). Balance hídrico de la laguna parón, herramienta para la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos (girh) en la Cuenca del Río Santa. *Pontificia Universidad Católica Del Perú*, 1, 111.

[http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/bitstream/handle/20.500.12404/6097/ACOSTA\\_CARLOS\\_DISEÑO\\_MAQUINA\\_REBANADORA.pdf?sequence=1](http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/bitstream/handle/20.500.12404/6097/ACOSTA_CARLOS_DISEÑO_MAQUINA_REBANADORA.pdf?sequence=1)

Municipalidad Provincial de Huamanga. (2014). *Gestión Municipal*. Gestión Municipal.

OCHA-ONU. (2023). *Perú: Emergencia por Inundaciones* (Número 03).

<http://bvpad.indec.gov.pe/doc/pdf/esp/doc2677/doc2677-contenido.pdf>

OSNIRH, & DEPHM. (2010). *PLAN DE PREVENCIÓN ANTE LA PRESENCIA DE FENOMENOS NATURALES POR INUNDACIONES, DESLIZAMIENTOS, HUAYCOS Y SEQUIAS* (Autoridad Nacional del Agua (ed.); 1° Edición). Ministerio de Agricultura. [http://sigrid.cenepred.gob.pe/docs/PARA\\_PUBLICAR/ANA/Plan de prevención ante la presencia de fenómenos naturales por inundaciones, deslizamientos, huaycos y sequias.pdf](http://sigrid.cenepred.gob.pe/docs/PARA_PUBLICAR/ANA/Plan_de_prevenccion_ante_la_presencia_de_fenomenos_naturales_por_inundaciones,_deslizamientos,_huaycos_y_sequias.pdf)

Palla, A., & Gnecco, I. (2015). Hydrologic modeling of Low Impact Development systems at the urban catchment scale. *Journal of Hydrology*, 528, 361–368.

<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.06.050>

PAVCO. (2018). Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible. *Junio*, 1–12.

Perales, S., Calcerrada, E., Badenes, C., & Beltran, I. (2019). *GUÍA BÁSICA DE DISEÑO DE SISTEMAS URBANOS DE DRENAJE SOSTENIBLE PARA EL TÉRMINO*

*MUNICIPAL DE CASTELLÓ DE LA PLANA* (Ayuntamiento de Castello de la Plana (ed.); Vol. 1). Green Blue Management.

Ress, L. D., Hung, C. L. J., & James, L. A. (2020). Impacts of urban drainage systems on stormwater hydrology: Rocky Branch Watershed, Columbia, South Carolina. *Journal of Flood Risk Management*, 13(3), 1–13. <https://doi.org/10.1111/jfr3.12643>

Rossmann, L. A. (2015). Storm Water Management Model Users Manual Version 5.1. En National Risk Management Research Laboratory (Ed.), *Environmental Protection Agency*. U.S. Environmental Protection Agency.

Rossmann, L. A., & Huber, W. C. (2016). Storm Water Management Model Reference Manual Volume III – Water Quality. *The United States Environmental Protection Agency Office of Research and Development, III*(January), 97–140.  
[www2.epa.gov/water-research](http://www2.epa.gov/water-research)

Valentín, M. G. (2007). *Hidrología urbana*.

Vishwakarma, R. K., & Joshi, H. (2023). Sustainability Evaluation of the Stormwater Drainage System in Six Indian Cities. *Sustainability*, 15, 14906.

Wilmer, Q. L. (2011). *Estudio hidrológico de la cuenca del rio vilca*.

# ANEXO 01: ANALISIS ESTADISTICO DE PRECIPITACIONES

LAT: 585 000 ZONA: 18S  
 LONG: 8 545 000  
 ALTITUD: 2746 msnm

ESTACION: HUAMANGA

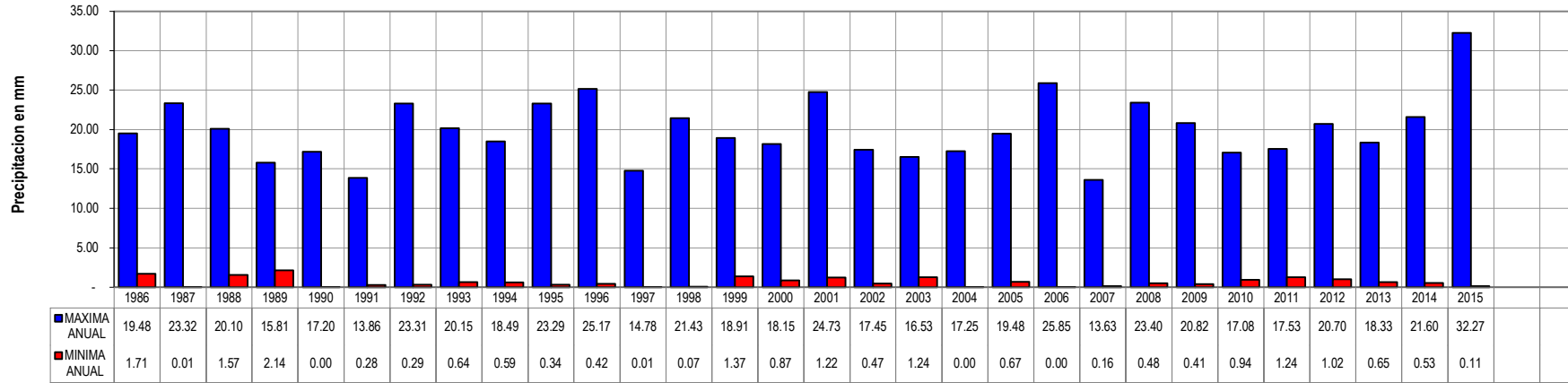
DPTO: AYACUCHO  
 PROV: HUAMANGA  
 DIST: HUAMANGA

## REGISTRO DE PRECIPITACION MAXIMA EN 24 HORAS (mm)

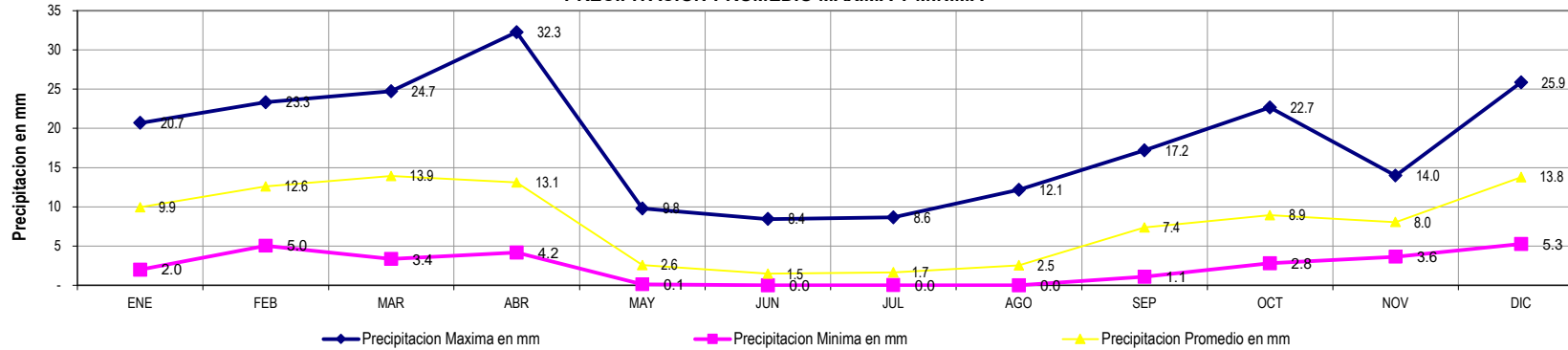
AÑOS	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	MAXIMA ANUAL	MINIMA ANUAL
1986	12.58	19.48	7.66	15.67	3.24	2.33	3.61	1.71	14.78	4.02	8.42	18.40	19.48	1.71
1987	13.15	23.32	14.12	21.30	9.81	0.01	0.07	0.13	12.08	6.62	5.90	9.93	23.32	0.01
1988	8.42	20.10	9.54	13.71	7.66	2.12	1.57	3.26	7.20	7.17	8.94	5.28	20.10	1.57
1989	7.77	9.01	15.81	6.41	3.22	8.43	2.14	5.67	4.85	7.84	8.29	11.34	15.81	2.14
1990	5.77	5.03	15.66	13.57	4.78	3.19	1.81	0.00	17.20	9.33	5.59	10.24	17.20	0.00
1991	8.53	6.21	9.15	7.75	0.28	2.86	1.01	4.50	2.89	13.86	6.26	6.34	13.86	0.28
1992	6.71	23.31	10.15	14.99	1.36	0.29	1.55	2.89	13.30	7.90	8.95	10.46	23.31	0.29
1993	7.62	11.68	18.15	20.15	4.16	1.42	0.64	1.69	7.00	6.92	8.69	16.45	20.15	0.64
1994	13.57	14.08	16.48	14.73	2.55	0.59	2.01	0.66	3.18	10.53	6.16	18.49	18.49	0.59
1995	9.30	6.32	16.05	23.29	1.72	0.34	0.63	1.24	10.38	6.05	5.98	7.77	23.29	0.34
1996	8.22	13.17	5.91	12.24	2.16	0.42	0.75	3.26	6.29	11.25	4.91	25.17	25.17	0.42
1997	13.63	14.78	10.93	4.19	0.12	1.30	0.01	0.43	5.14	10.45	9.05	8.13	14.78	0.01
1998	16.30	14.03	21.43	10.68	2.67	1.30	1.36	0.07	8.48	9.80	5.24	8.04	21.43	0.07
1999	8.79	11.31	10.47	18.91	1.40	1.37	1.74	2.49	9.93	2.81	7.20	17.83	18.91	1.37
2000	11.32	14.10	10.63	10.32	5.23	0.87	1.35	2.77	3.22	11.26	4.18	18.15	18.15	0.87
2001	2.00	15.87	24.73	20.96	3.92	1.22	5.19	5.23	6.94	7.98	10.34	7.67	24.73	1.22
2002	7.15	13.51	17.45	5.44	1.67	0.47	0.70	3.57	3.32	2.91	5.72	12.80	17.45	0.47
2003	8.93	9.11	10.83	4.42	1.24	2.74	8.65	4.31	12.59	8.29	11.80	16.53	16.53	1.24
2004	5.35	7.58	10.86	4.17	2.19	0.00	0.56	1.07	3.33	17.25	7.28	16.68	17.25	0.00
2005	19.48	9.75	11.06	14.53	0.67	2.57	0.76	1.73	7.53	8.53	12.04	15.27	19.48	0.67
2006	5.40	11.68	16.04	7.23	3.34	0.00	1.35	0.48	1.09	14.92	13.96	25.85	25.85	0.00
2007	12.06	10.41	3.35	13.63	2.64	2.83	0.16	0.81	6.87	6.66	5.04	12.74	13.63	0.16
2008	5.92	8.38	23.40	21.56	1.40	0.48	1.47	3.51	4.62	22.66	13.02	7.72	23.40	0.48
2009	10.30	10.54	15.45	9.36	1.22	0.80	0.41	6.55	4.32	5.37	5.32	20.82	20.82	0.41
2010	13.20	17.08	16.20	4.23	1.05	1.23	1.09	0.94	2.45	8.94	11.23	14.36	17.08	0.94
2011	7.84	8.89	8.88	17.53	1.34	1.50	1.66	1.24	17.18	11.69	8.98	13.39	17.53	1.24
2012	20.70	8.84	16.30	8.40	1.09	1.02	1.88	12.14	3.23	8.86	3.64	16.16	20.70	1.02
2013	11.11	<u>10.72</u>	15.18	12.43	1.96	1.62	2.22	0.65	7.30	4.92	10.21	18.33	18.33	0.65
2014	7.93	18.01	21.60	9.30	2.45	0.53	2.21	2.94	7.87	6.29	10.31	12.81	21.60	0.53
2015	8.62	11.95	14.31	32.27	1.16	0.68	1.36	0.11	6.92	6.86	8.54	10.22	32.27	0.11
MEDIA MENSUAL	9.9	12.6	13.9	13.1	2.6	1.5	1.7	2.5	7.4	8.9	8.0	13.8		
MAXIMA MENSUAL	20.7	23.3	24.7	32.3	9.8	8.4	8.6	12.1	17.2	22.7	14.0	25.9		
MINIMA MENSUAL	2.0	5.0	3.4	4.2	0.1	0.0	0.0	0.0	1.1	2.8	3.6	5.3		

Fuente: Senamhi, Producto-Pisco

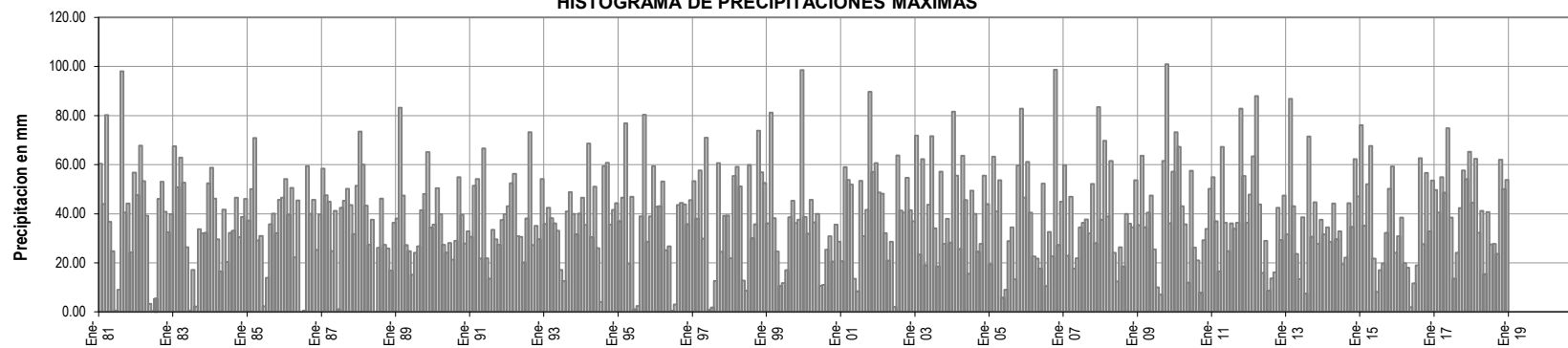
### VARIACION DE LA PRECIPITACION PROMEDIO MAXIMA Y MINIMA ANUAL



### PRECIPITACION PROMEDIO MAXIMA Y MINIMA



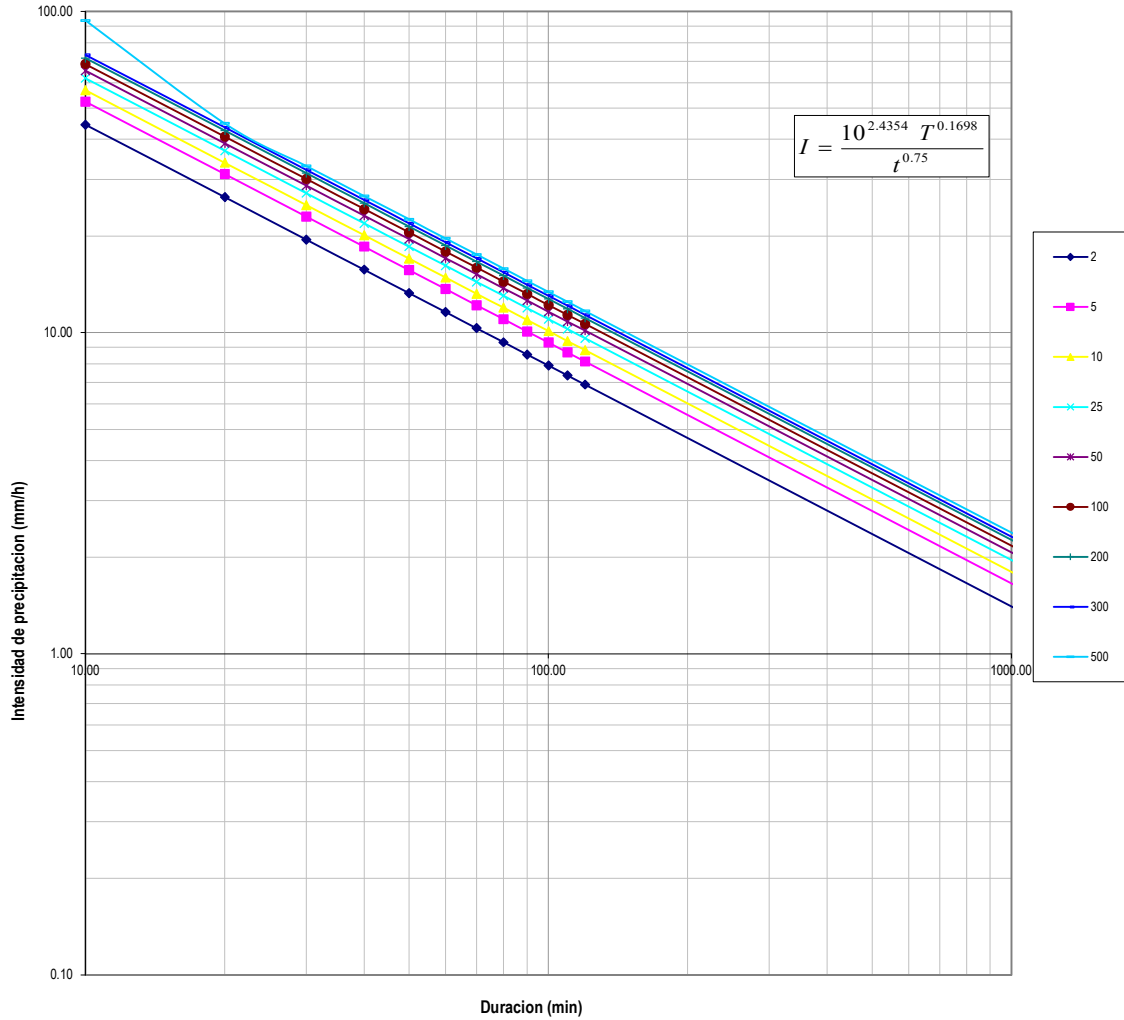
HISTOGRAMA DE PRECIPITACIONES MAXIMAS



**CUADRO: INTENSIDADES DE DISEÑO PARA DURACIONES MENORES A 24 HORAS**

ESTACION HUAMANGA										
DURACION		PERIODO DE RETORNO								
Hr	min	2	5	10	25	50	100	200	300	500
0.17	10.00	44.43	52.39	56.90	61.97	65.42	68.61	71.62	73.30	93.80
0.33	20.00	26.42	31.15	33.83	36.85	38.90	40.79	42.59	43.58	44.81
0.50	30.00	19.49	22.99	24.96	27.19	28.70	30.10	31.42	32.16	33.06
0.67	40.00	15.71	18.52	20.12	21.91	23.13	24.26	25.32	25.92	26.64
0.83	50.00	13.29	15.67	17.02	18.53	19.57	20.52	21.42	21.92	22.54
1.00	60.00	11.59	13.67	14.84	16.17	17.06	17.90	18.68	19.12	19.66
1.17	70.00	10.32	12.17	13.22	14.40	15.20	15.94	16.64	17.03	17.51
1.33	80.00	9.34	11.01	11.96	13.03	13.75	14.42	15.06	15.41	15.84
1.50	90.00	8.55	10.08	10.95	11.93	12.59	13.20	13.78	14.11	14.50
1.67	100.00	7.90	9.32	10.12	11.02	11.63	12.20	12.74	13.03	13.40
1.83	110.00	7.36	8.67	9.42	10.26	10.83	11.36	11.86	12.14	12.48
2.00	120.00	6.89	8.13	8.82	9.61	10.15	10.64	11.11	11.37	11.69
24.00	1440.00	1.07	1.26	1.37	1.49	1.57	1.65	1.72	1.76	1.81

**CURVA INTENSIDAD-DURACION-FRECUENCIA**



**CUADRO: PRECIPITACION DE DISEÑO PARA DURACIONES MENORES A 24 HORAS**

<b>ESTACION HUAMANGA</b>										
<b>DURACION</b>		<b>PERIODO DE RETORNO</b>								
<b>Hr</b>	<b>min</b>	<b>2</b>	<b>5</b>	<b>10</b>	<b>25</b>	<b>50</b>	<b>100</b>	<b>200</b>	<b>300</b>	<b>500</b>
0.17	10.00	7.40	8.73	9.48	10.33	10.90	11.43	11.94	12.22	15.63
0.33	20.00	8.81	10.38	11.28	12.28	12.97	13.60	14.20	14.53	14.94
0.50	30.00	9.74	11.49	12.48	13.59	14.35	15.05	15.71	16.08	16.53
0.67	40.00	10.47	12.35	13.41	14.61	15.42	16.17	16.88	17.28	17.76
0.83	50.00	11.07	13.06	14.18	15.45	16.30	17.10	17.85	18.27	18.78
1.00	60.00	11.59	13.67	14.84	16.17	17.06	17.90	18.68	19.12	19.66
1.17	70.00	12.04	14.20	15.42	16.80	17.73	18.60	19.42	19.87	20.43
1.33	80.00	12.45	14.69	15.95	17.37	18.34	19.23	20.08	20.55	21.12
1.50	90.00	12.83	15.13	16.43	17.89	18.89	19.81	20.68	21.16	21.76
1.67	100.00	13.17	15.53	16.86	18.37	19.39	20.33	21.23	21.72	22.34
1.83	110.00	13.48	15.90	17.27	18.81	19.86	20.82	21.74	22.25	22.87
2.00	120.00	13.78	16.25	17.65	19.22	20.29	21.28	22.22	22.74	23.38
24.00	1440.00	<b>25.65</b>	<b>30.25</b>	<b>32.85</b>	<b>35.78</b>	<b>37.77</b>	<b>39.61</b>	<b>41.35</b>	<b>42.32</b>	<b>43.51</b>

**CUADRO: PRECIPITACIONES MAXIMAS ANUALES EN 24 HORAS PERIODO COMUN - HUAMANGA**

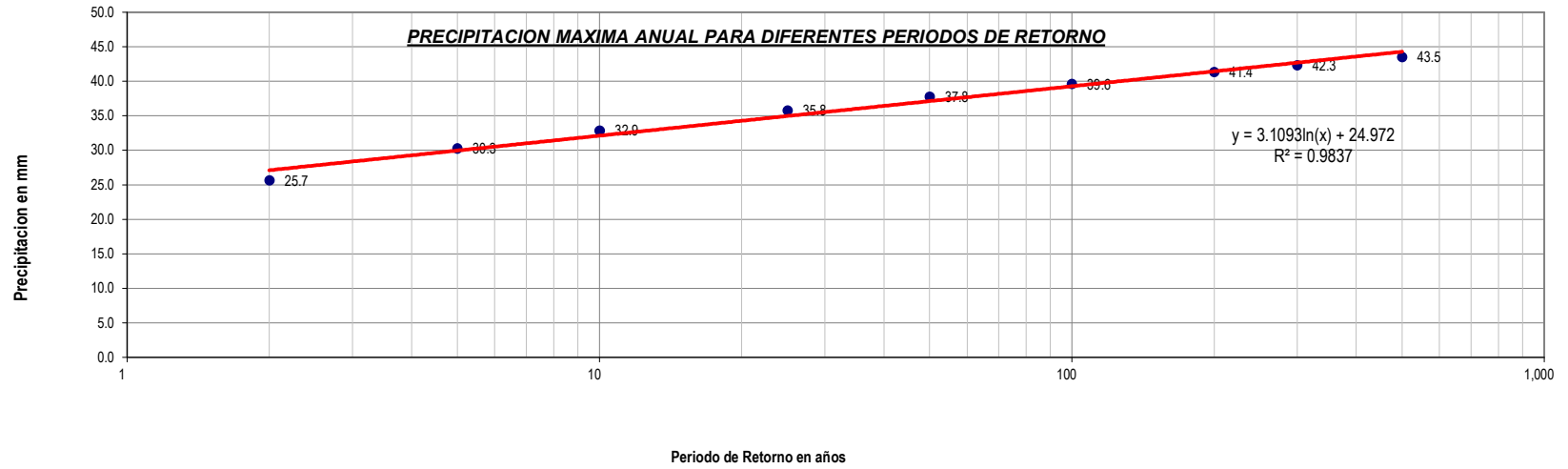
**DATOS HUAMANGA**

Kolmogorov-Smirnov test for	a=1%	a=5%	a=10%	Attained a	DMax
<b>Gamma</b>	<b>ACCEPT</b>	<b>ACCEPT</b>	<b>ACCEPT</b>	<b>99.9100%</b>	<b>0.06059</b>
LogNormal	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	99.6859%	0.0663
GEV-Min (L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	99.6307%	0.06716
Normal	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	99.4279%	0.06964
GEV-Min	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	99.3961%	0.06996
Pearson III	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	99.3033%	0.07084
GEV-Max (L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	99.2897%	0.07096
Normal (L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	99.2522%	0.07129
Log Pearson III	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	99.0201%	0.07308
Galton	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	98.9403%	0.07362
GEV-Max	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	98.8276%	0.07434
EV1-Max (Gumbel)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	98.3971%	0.07669
EV1-Max (Gumbel)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	97.2846%	0.08121
GEV-Max (kappa specified)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	91.9123%	0.09378
EV2-Max (L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	91.7730%	0.09402
EV3-Min (Weibull)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	90.9274%	0.09547
EV3-Min (Weibull)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	90.3402%	0.09643
Exponential	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	89.9412%	0.09707
GEV-Min (kappa specified)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	87.6097%	0.10058
Exponential (L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	87.4053%	0.10087
GEV-Min (kappa specified)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	87.1962%	0.10117
EV2-Max	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	82.7061%	0.10712
GEV-Max (kappa specified)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	80.6067%	0.1097
Pareto (L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	63.5838%	0.12869
EV1-Min (Gumbel)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	54.8931%	0.13822
EV1-Min (Gumbel)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	53.7016%	0.13956
Pareto	ACCEPT	ACCEPT	REJECT	5.9627%	0.23466

Tr (años)	$P(X \leq x_T)$	$P_{MAX}$ mm
2	0.500	25.7
5	0.800	30.3
10	0.900	32.9
25	0.960	35.8
50	0.980	37.8
100	0.990	39.6
200	0.995	41.4

300	0.997	42.3
500	0.998	43.5





CUADRO: DATOS DE PRECIPITACIÓN MÁXIMA EN 24 HORAS, HUAMANGA

Nº	AÑO	P24	log(P24)
1	1986	25.3	1.4036
2	1987	30.3	1.4817
3	1988	26.1	1.4171
4	1989	20.6	1.3129
5	1990	22.4	1.3493
6	1991	18.0	1.2556
7	1992	30.3	1.4814
8	1993	26.2	1.4181
9	1994	24.0	1.3808
10	1995	30.3	1.4812
11	1996	32.7	1.5148
12	1997	19.2	1.2837
13	1998	27.9	1.4450
14	1999	24.6	1.3907
15	2000	23.6	1.3728
16	2001	32.1	1.5071
17	2002	22.7	1.3558
18	2003	21.5	1.3322
19	2004	22.4	1.3507
20	2005	25.3	1.4035
21	2006	33.6	1.5265
22	2007	17.7	1.2485
23	2008	30.4	1.4831
24	2009	27.1	1.4324
25	2010	22.2	1.3465
26	2011	22.8	1.3577
27	2012	26.9	1.4298
28	2013	23.8	1.3771
29	2014	28.1	1.4484
30	2015	41.9	1.6227
Numero de datos <b>n</b>		30	30
Suma $\Sigma$		780.1	42.2108
Maximo		41.9	1.6227
Minimo		17.7	1.2485
Promedio <b>x</b>		26.0	1.4070
Desviacion estándar <b>s</b>		5.2100	0.0841
Coficiente asimetria <b>Cs</b>		0.9060	0.2665
Cs/6 <b>k</b>			0.0444

41.9  
17.7

**PRUEBA DE DATOS DUDOSOS**

n = 30  
Kn = 2.563 (Tabla 12.5.3 - Hidrologia Aplicada, Ven Te Chow)

Umbral de datos dudosos altos

yH = 1.6227  
QH = 41.9

Umbral de datos dudosos bajos

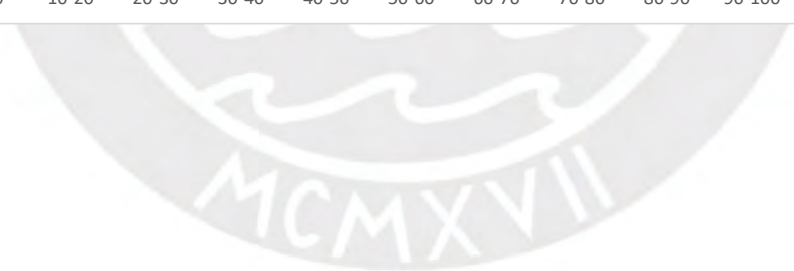
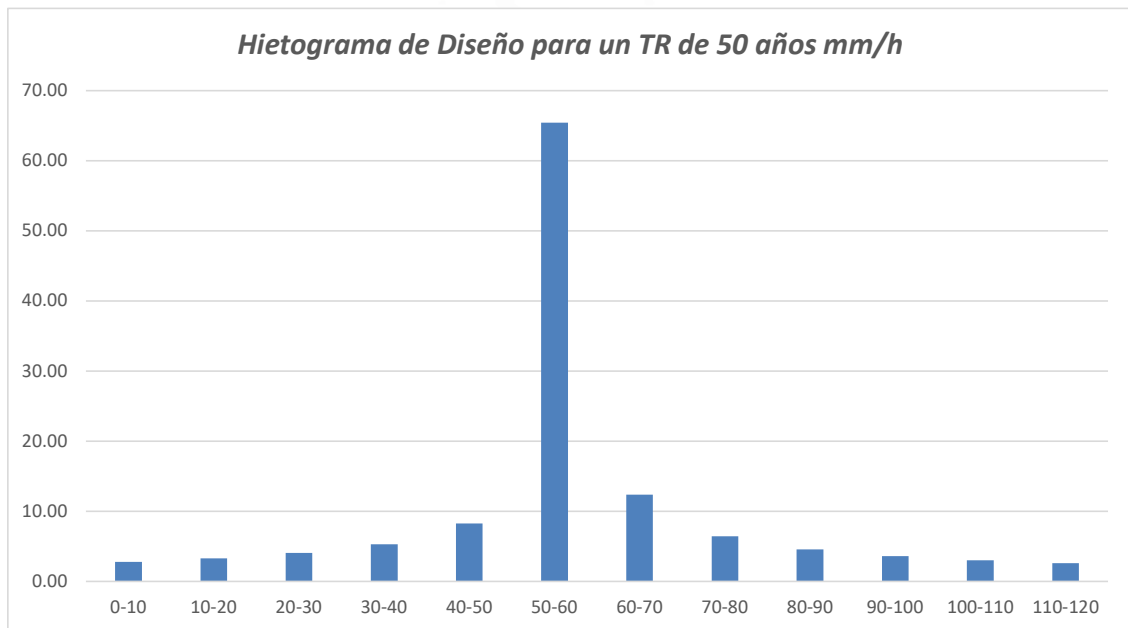
yL = 1.1914

QL = 15.5

Nº	AÑO	P24	log(P24)
1	1986	25.33	1.4036
2	1987	30.32	1.4817
3	1988	26.13	1.4171
4	1989	20.55	1.3129
5	1990	22.35	1.3493
6	1991	18.01	1.2556
7	1992	30.30	1.4814
8	1993	26.19	1.4181
9	1994	24.03	1.3808
10	1995	30.28	1.4812
11	1996	32.72	1.5148
12	1997	19.22	1.2837
13	1998	27.86	1.4450
14	1999	24.59	1.3907
15	2000	23.60	1.3728
16	2001	32.14	1.5071
17	2002	22.69	1.3558
18	2003	21.49	1.3322
19	2004	22.42	1.3507
20	2005	25.32	1.4035
21	2006	33.61	1.5265
22	2007	17.72	1.2485
23	2008	30.41	1.4831
24	2009	27.07	1.4324
25	2010	22.21	1.3465
26	2011	22.79	1.3577
27	2012	26.91	1.4298
28	2013	23.83	1.3771
29	2014	28.08	1.4484
30	2015	41.95	1.6227
Numero de datos <b>n</b>		30	30
Suma $\Sigma$		780.1	42.2108
Maximo		41.9	1.6227
Minimo		17.7	1.2485
Promedio <b>x</b>		26.0036	1.4070
Desviacion estándar <b>s</b>		5.2100	0.0841
Coficiente asimetria <b>Cs</b>		0.9060	0.2665
Cs/6 <b>k</b>			0.0444

**Hietograma de 2 horas de duracion con un periodo de retorno de 50 años**

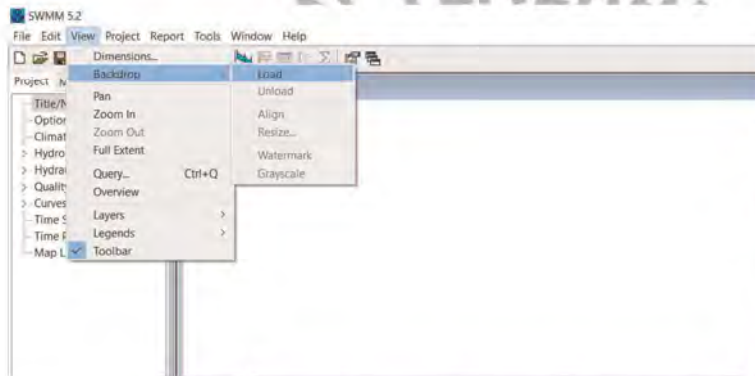
Tiempo min	Duracion min	Intensidad mm/min	Lamina de precipitacion mm	Lamina acumulada mm	Precipitacion mm	INTENSIDAD mm/h
0-10	10	65.42	10.90	10.90	0.47	2.81
10-20	20	38.90	12.97	2.06	0.55	3.29
20-30	30	28.70	14.35	1.38	0.67	4.02
30-40	40	23.13	15.42	1.07	0.88	5.31
40-50	50	19.57	16.30	0.88	1.38	8.30
50-60	60	17.06	17.06	0.76	10.90	65.42
60-70	70	15.20	17.73	0.67	2.06	12.38
70-80	80	13.75	18.34	0.60	1.07	6.42
80-90	90	12.59	18.89	0.55	0.76	4.56
90-100	100	11.63	19.39	0.50	0.60	3.61
100-110	110	10.83	19.86	0.47	0.50	3.02
110-120	120	10.15	20.29	0.44	0.44	2.62



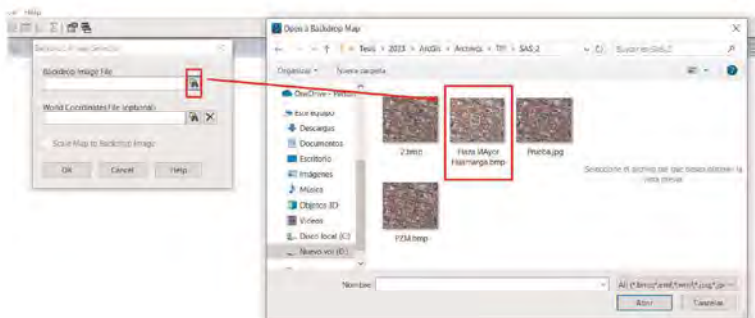
## ANEXO N° 2 Modelado computacional de areas de estudio

### Importacion de mapa

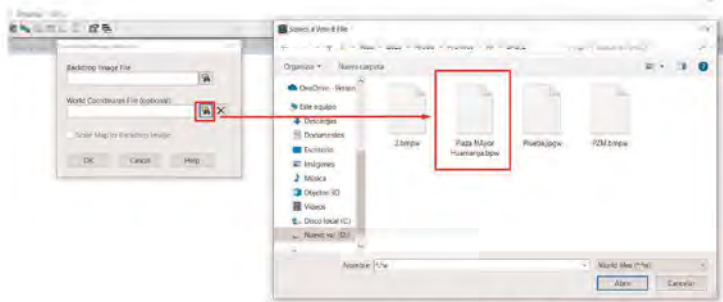
El procedimiento que se ha seguido inicia en la importacion del mapa de bits del area de estudio. La principal aplicacion de este archivo es que sirve de guia a escala real para plasmar con mayor exactitud las caracteristicas geograficas de la simulacion. Ya que una de las principales deficiencias del software SWMM v.5.2, es que no se puede asignar coordenadas geograficas a los nodos o puntos a simular. El mapa de bits es cargado en la opcion de *View*, luego en la pestaña de *Backdrop*, y finalmente en *Load*. El mapa de bits tiene como formato de imagen el *.bmp*.



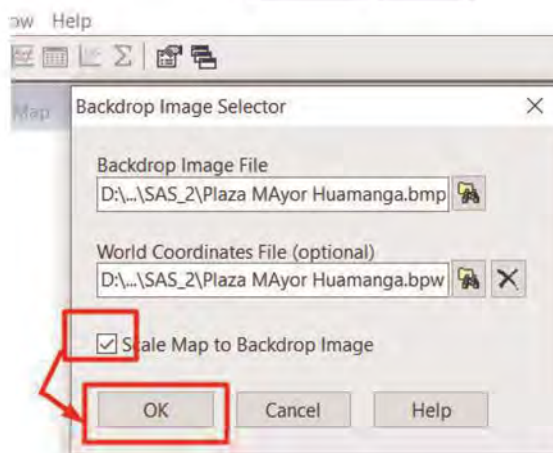
Una vez abierta la opcion de *Load*, en el cuadro de *Background Image Selector*, se ha de seleccionar la opcion de cargar archivo en el espacio correspondiente a *Background Image File*. Luego de abierto el cuadro para cargar el archivo, se carga el mapa de bits en formato *.bmp* del area de interes.



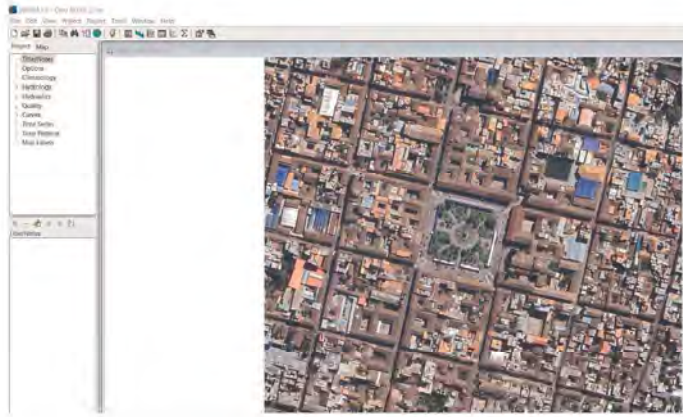
Por otro lado, para cargar las características geográficas del mapa se ha de seleccionar la opción de cargar archivo de la opción *World Coordinates File*. Una vez abierto el cuadro se carga el archivo ligado al mapa de bits seleccionado en la opción anterior, en formato de archivo de mapa de bits para trabajo en ESRI *.bpw*.



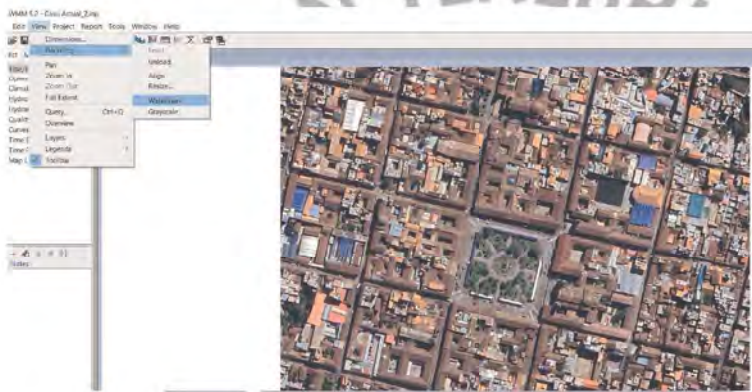
Una vez seleccionados y cargados ambos archivos, se ha de seleccionar en la ventana con un check en la opción para escalar la imagen del mapa cargado, y se finaliza en la opción OK.



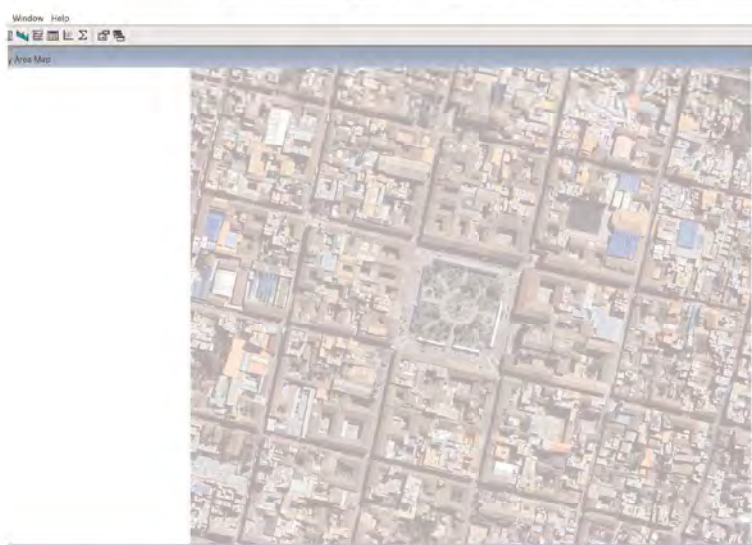
Finalizada la carga, se puede verificar que el mapa ha sido correctamente importado. Sin embargo, para evitar que el color del mapa interfiera con los colores de los nodos a colocar, es necesario que el mapa tenga el formato de marca de agua, ya que de esta manera se reduce la intensidad de los colores del mapa sin perderlo para una adecuada guía durante la colocación de nodos.



El procedimiento para darle formato de marca de agua al mapa inicia en la pestaña *View*, posteriormente se selecciona la pestaña *Backdrop*, y finalmente se selecciona la opción *Watermark*.



De esta manera el mapa ha quedado como se muestra a continuación.

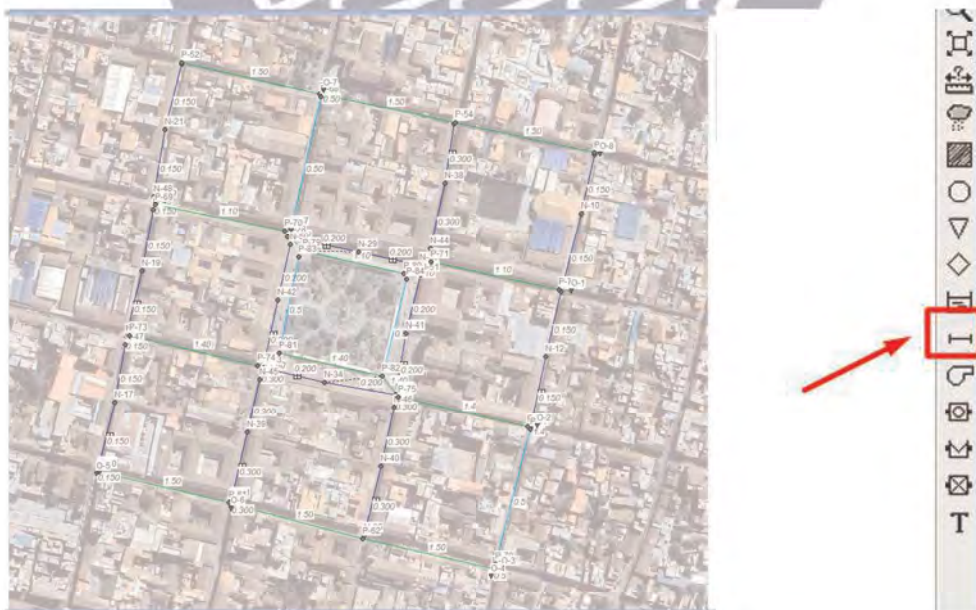


## Creacion de redes de desague pluvial en SWMM 5.2

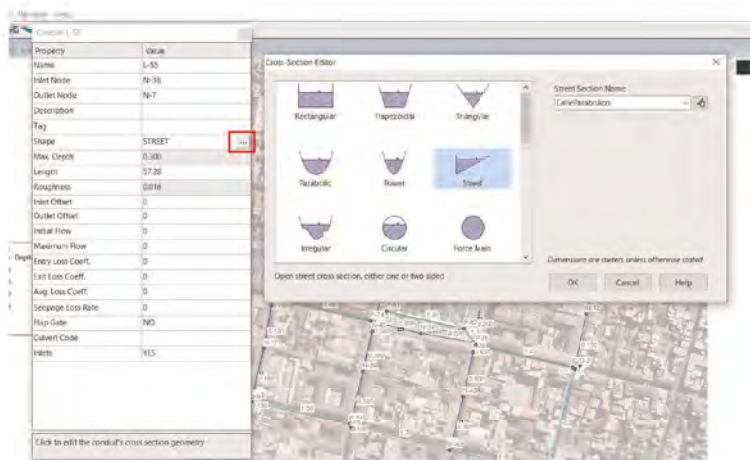
En primer lugar, los nodos fueron trazados con la opción de “Add a junction node”, cuyo icono se muestra en la parte derecha de la pantalla:



Se ha realizado el trazo de las líneas, las cuales representan las calles (por donde transita el agua de lluvia) y los canales subterráneos, para esto se utiliza “Add a Conduit link”

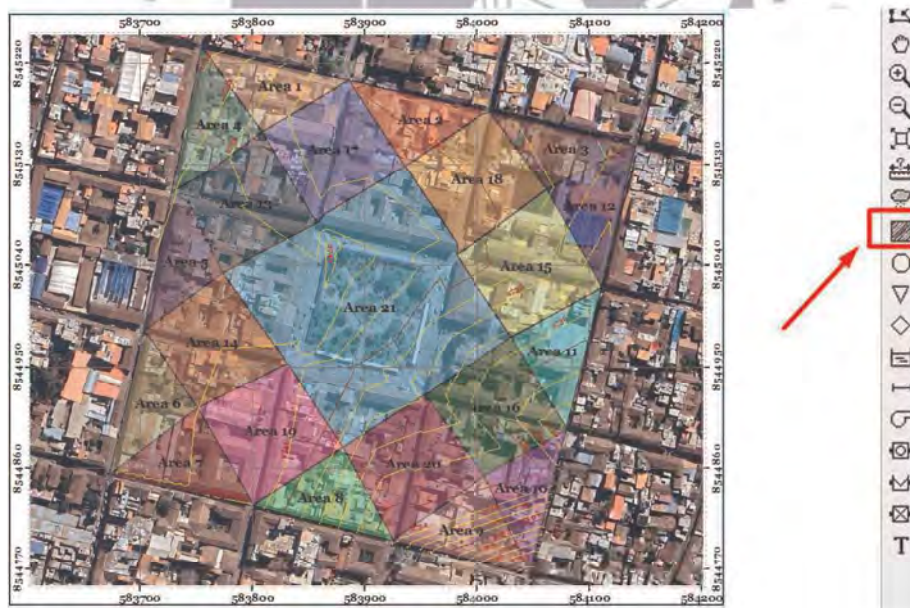


Para definir la forma y/o tipo de sección que tendrán los conductos, se hace lo siguiente luego de darle doble clic al conducto a editar:



Es aquí donde se diferencia a los conductos superficiales como cunetas o calles de los conductos subterráneos

Para el ingreso de las subcuencas, Solo se dibuja, para esto nos apoyamos del plano generado en el ArcGIS según la figura *donde estan todas las areas gaa*

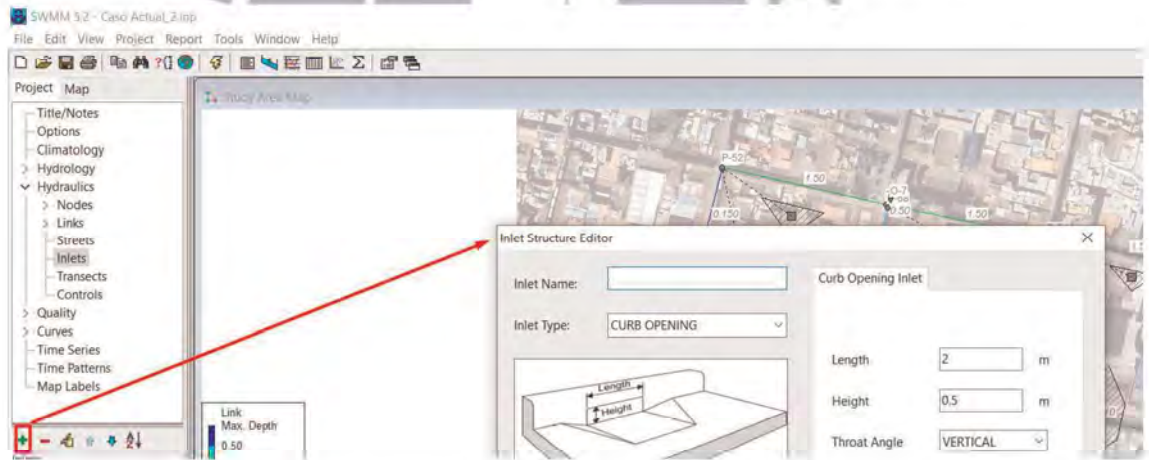


Para no saturar con trazos grandes y que llenan la hoja de trabajo en el SWMM se dibuja las cuencas de manera representativa, y posteriormente se le agrega el área de manera manual:



Es importante aclarar que las características de las cuencas se calculan previamente.

Para conectar las aguas superficiales con la subterránea primero se crea Inlets:



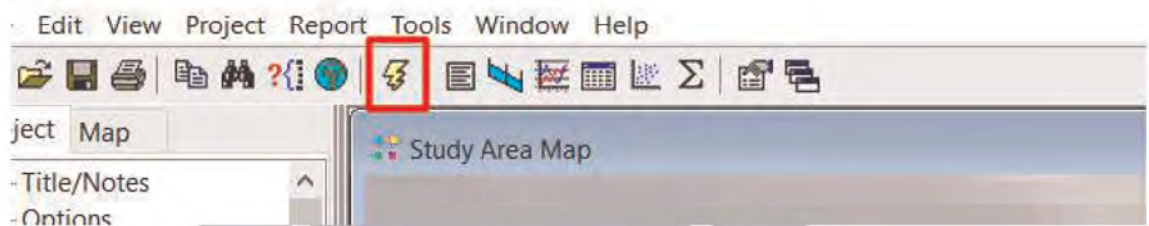
Una vez creado estos inlets, se crea la conexión de la siguiente manera:

Property	Value
Name	L-61
Inlet Node	N-17
Outlet Node	N-16
Description	
Tag	
Shape	STREET
Max. Depth	0.150
Length	67.40
Roughness	0.016
Inlet Offset	0
Outlet Offset	0
Initial Flow	0
Maximum Flow	0
Entry Loss Coeff.	0
Exit Loss Coeff.	0
Avg. Loss Coeff.	0
Seepage Loss Rate	0
Flap Gate	NO
Culvert Code	
Inlets	YES

Click to add/edit inlets.

Finalmente, para correr el programa se da en el icono siguiente:

SWMM 5.2 - Caso Actual\_2.inp



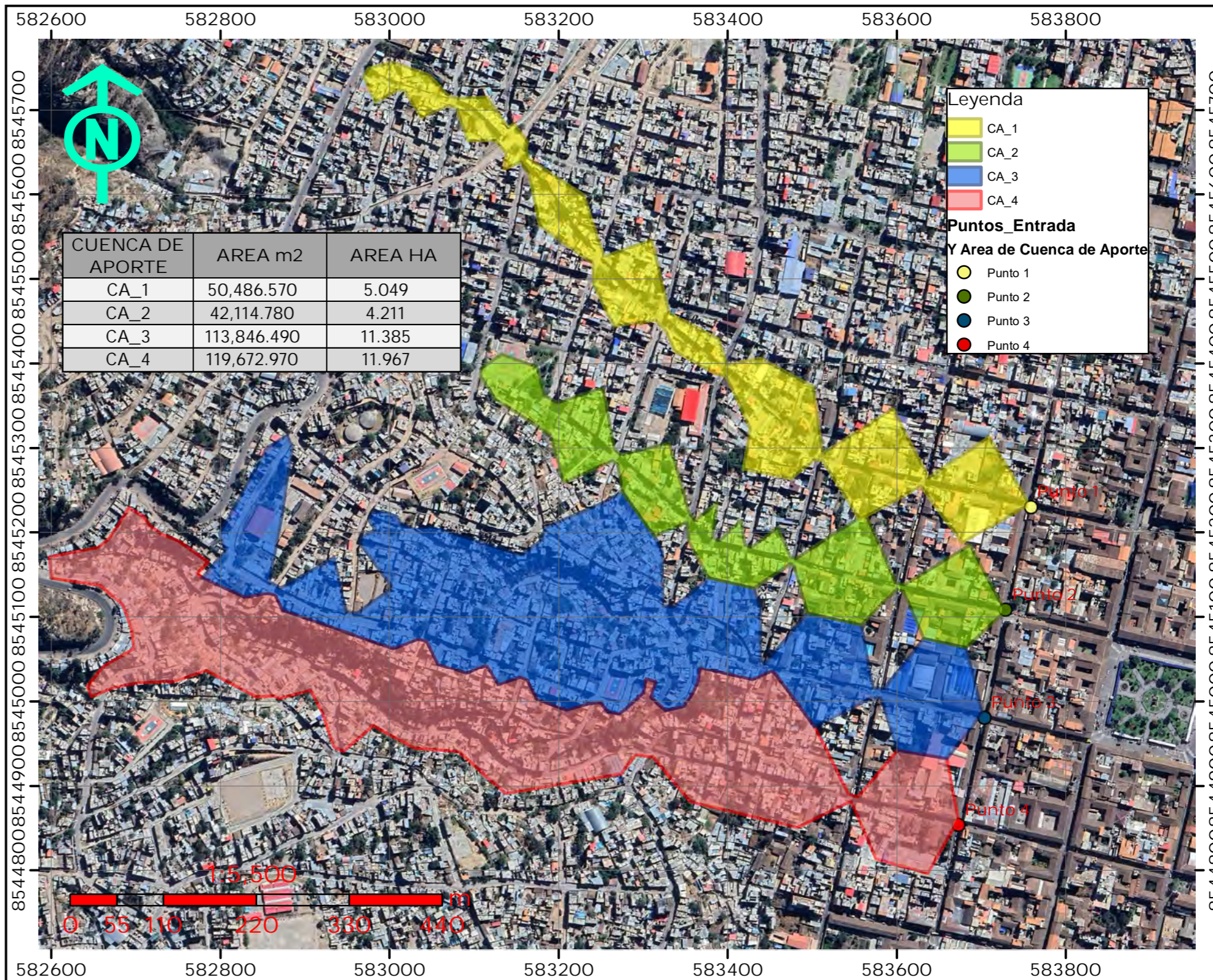
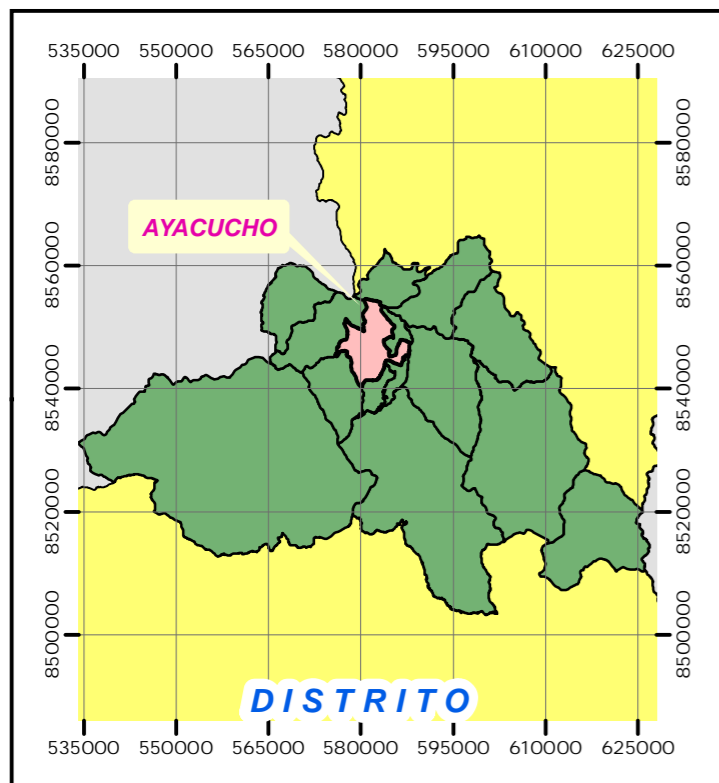
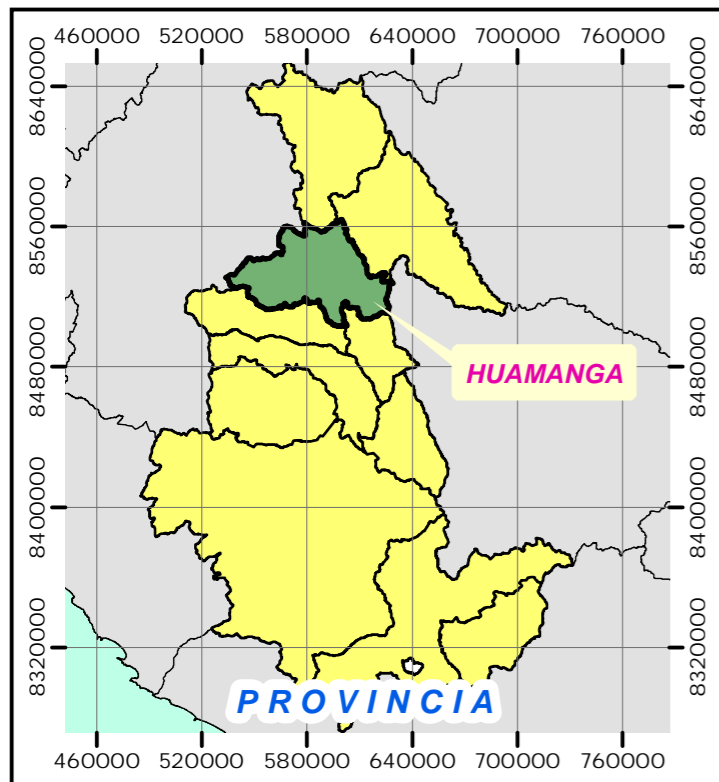
**ANEXO N° 3: CALCULO DE COTAS Y MAXIMAS PROFUNDIDES DE NODOS EN EL MODELO PLAZA MAYOR HUAMANGA**

INICIAL	FINAL	ELEV SUPERFICIAL DEL NODO INICIAL	INVERT	MAX DETH	LONGITUD	PENDIENTE	OBJETIVO	OFFSET
P-52	P-53	2744.70	2742.70	2.00	135.93	0.03		
P-53	P-54	2740.25	2737.94	2.31	133.07	0.01		
P-54	P-55	2739.15	2736.61	2.54	137.21	0.01		
P-55		2737.60	2735.24	2.36				
P-60	P-61	2742.00	2739.80	2.20	128.75	0.01		
P-61	P-62	2741.00	2738.51	2.49	132.85	0.05		
P-62	P-63	2734.00	2731.47	2.53	128.33	0.09		
P-63		2723.00	2720.31	2.69				
P-69	P-70	2743.05	2741.05	2.00	127.17	0.01		
P-70	P-79	2741.50	2739.14	2.36	25.34	0.00		
P-79	P-80	2741.44	2739.02	2.42	99.94	0.02		
P-80	P-71	2739.50	2737.42	2.08	28.51	0.01		
P-71	P-72	2740.30	2737.27	3.03	126.06	0.02		
P-72		2736.50	2734.12	2.38				
P-73	P-74	2742.65	2740.65	2.00	126.09	0.01		
P-74	P-81	2741.50	2739.14	2.36	23.83	0.00		
P-81	P-82	2742.00	2739.02	2.98	101.36	0.03		
P-82	P-75	2738.50	2736.48	2.02	25.18	0.03		
P-75	P-76	2737.90	2735.85	2.05	128.83	0.05		
P-76		2732.00	2729.67	2.33				
P-83	P-81	2743.00	2741.00	2.00	93.30	0.01		
P-81		2742.00	2739.60	2.40				0.5827
P-84	P-82	2739.40	2737.40	2.00	94.93	0.01		
P-82		2738.50	2735.98	2.52				0.5077
P-77	P-78	2732.00	2730.00	2.00	132.41	0.07		
P-78		2724.00	2721.39	2.61				
P-67	P-68	2741.65	2739.65	2.00	129.34	0.02		
P-68		2740.25	2737.71	2.54				

**ANEXO N° 4: CALCULO DE COTAS Y MAXIMAS PROFUNDIDES DE NODOS EN EL MODELO CERRO LA PICOTA**

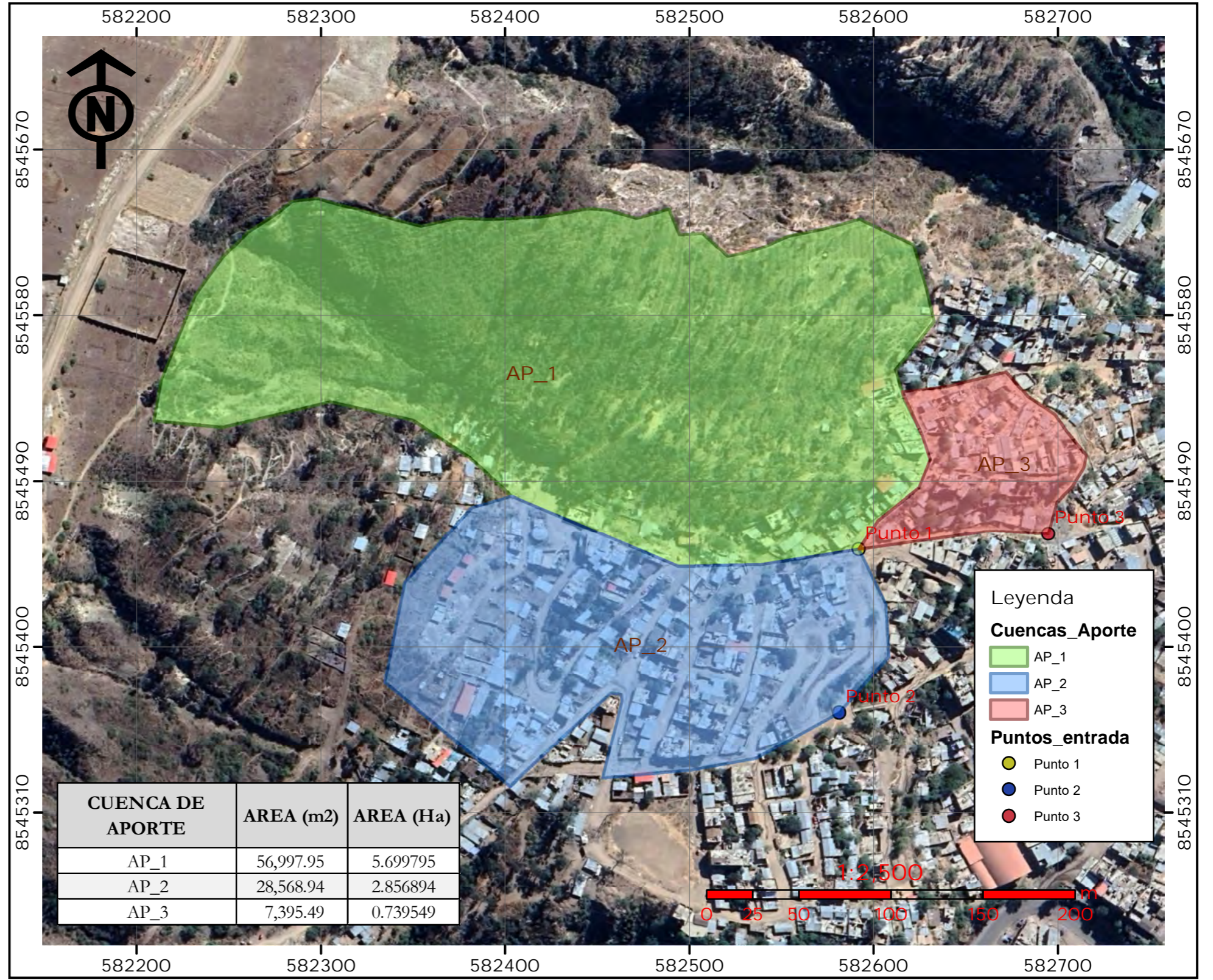
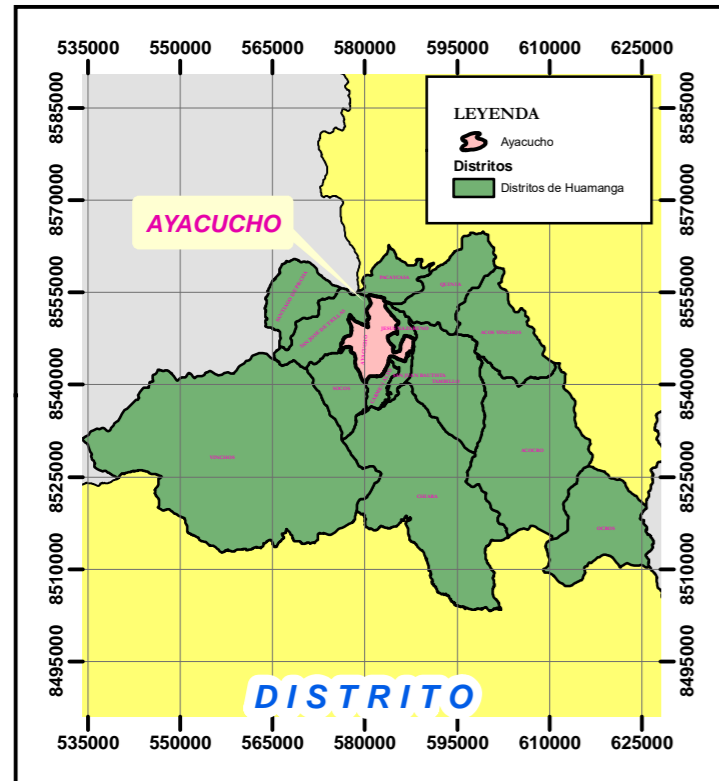
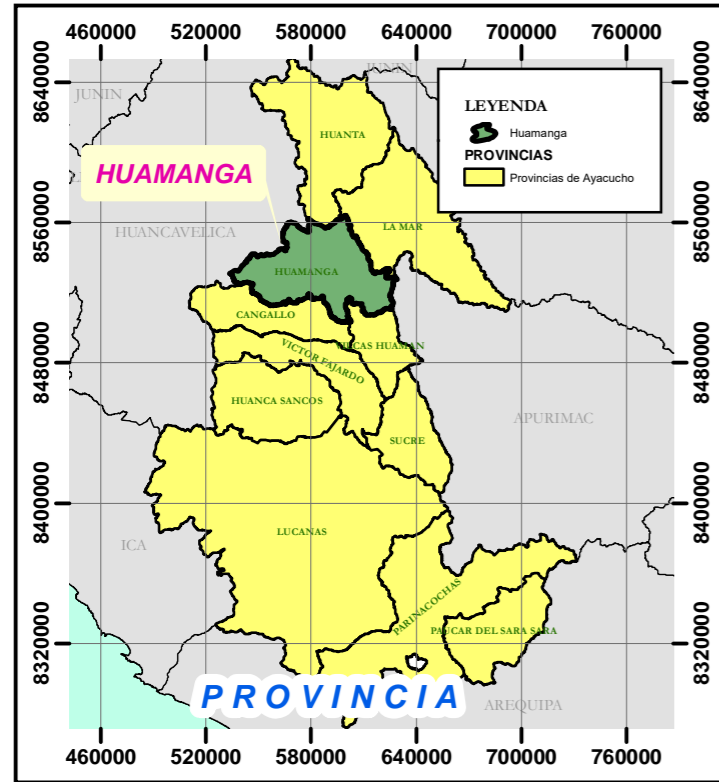
INICIAL	FINAL	ELEV SUPERFICIAL DEL NODO INICIAL	INVERT	MAX DETH	LONGITUD	PENDIENTE	OBJETIVO	OFFSET
P-74	P-75	2950.00	2948.00	2.00	84.03	0.19		
P-75	P-76	2934.00	2931.82	2.18	42.38	0.16		
P-76	P-77	2927.00	2924.94	2.06	70.06	0.18		
P-77	P-78	2914.50	2912.50	2.00	71.77	0.20		
P-78	P-96	2900.00	2897.97	2.03	6.65	0.15		
P-96		2899.00	2896.97	2.03				0.22
P-98	P-99	2956.00	2954.00	2.00	14.28	0.32		
P-99	P-100	2951.50	2949.43	2.07	59.04	0.23		
P-100	P-101	2938.00	2935.85	2.15	35.97	0.19		
P-101	P-102	2931.00	2928.84	2.16	29.07	0.01		
P-102	P-104	2930.80	2928.55	2.25	23.11	0.01		
P-104	P-105	2930.40	2928.32	2.08	15.92	0.02		
P-105	P-90	2930.10	2928.08	2.02	17.34	0.01		
P-90	P-91	2930.00	2927.90	2.10	75.78	0.19		
P-91		2915.20	2913.13	2.07				
P-86	P-87	2941.00	2939.00	2.00	26.49	0.12		
P-87	P-97	2938.00	2935.82	2.18	13.87	0.37		
P-97	P-79	2933.00	2930.76	2.24	14.04	0.28		
P-79	P-80	2929.00	2926.83	2.17	41.11	0.13		
P-80	P-81	2923.70	2921.69	2.01	56.33	0.19		
P-81	P-82	2913.00	2910.99	2.01	9.76	0.15		
P-82	P-83	2911.50	2909.47	2.03	15.99	0.17		
P-83	P-92	2908.80	2906.75	2.05	73.59	0.03		
P-92	P-84	2906.70	2904.55	2.15	16.85	0.05		
P-84	P-93	2905.80	2903.70	2.10	31.48	0.03		
P-93	P-85	2904.70	2902.60	2.10	27.30	0.04		
P-85	P-94	2903.75	2901.65	2.10	60.35	0.05		
P-94	P-95	2900.80	2898.63	2.17	28.08	0.04		
P-95	P-96	2900.00	2897.65	2.35	8.98	0.10		
P-96		2899.00	2896.75	2.25				

ANEXO 05: AREAS DE APOORTE PLUVIAL PLAZA MAYOR DE HUAMANGA



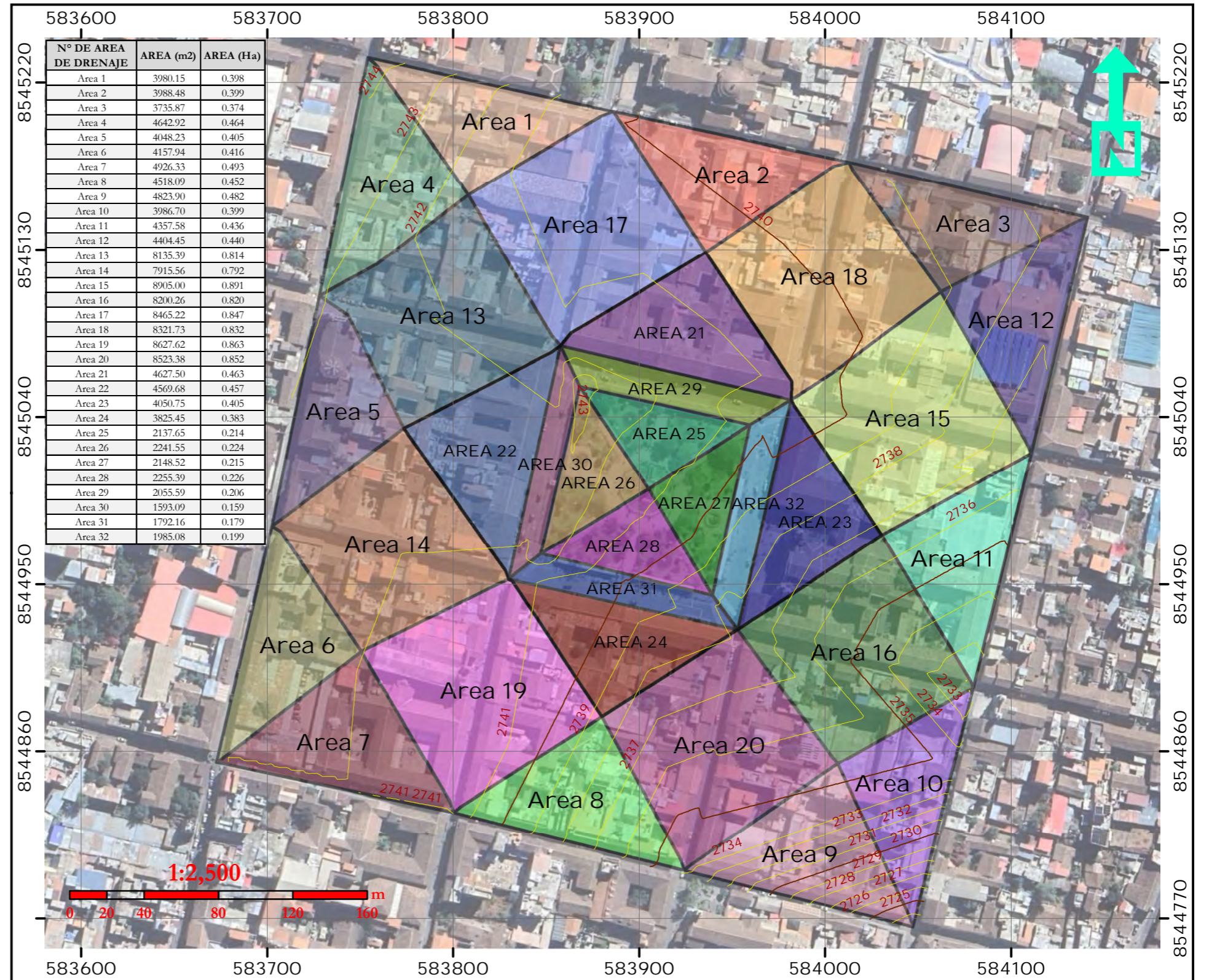
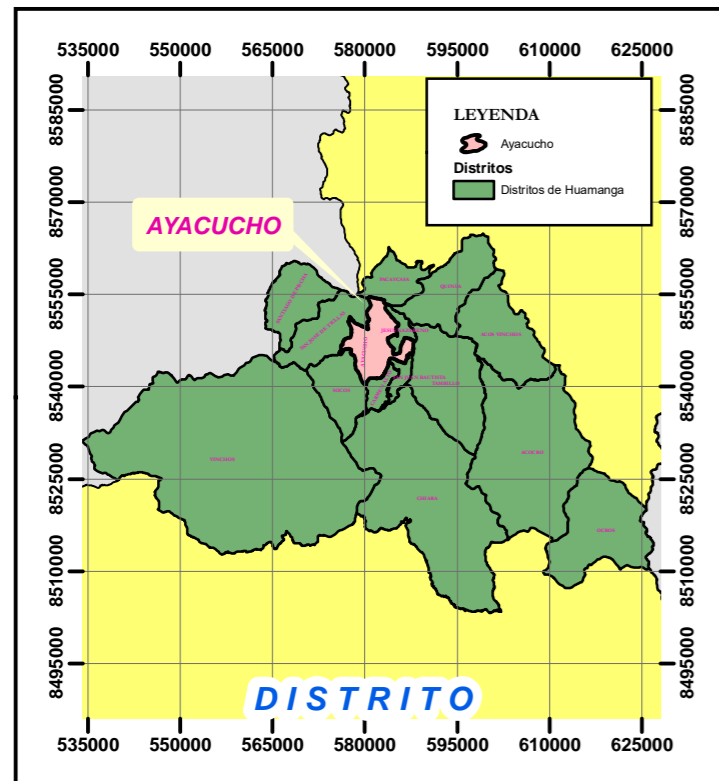
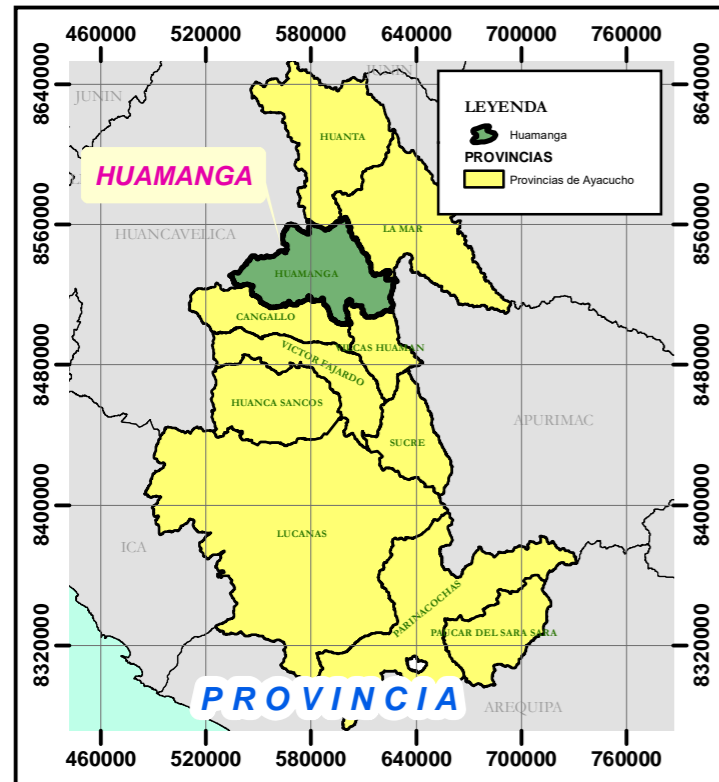
	NOMBRE DE LA TESIS	<b>UBICACIÓN</b>	<b>ALUMNOS:</b>	<b>ASESORA:</b>	<b>PLANO:</b>	<b>SISTEMA DE COORDENADAS</b>	ESCALA
	<b>APLICACIÓN DE TÉCNICAS DE DRENAJE URBANO SOSTENIBLE EN LA REGIÓN DE AYACUCHO PARA EL MEJORAMIENTO DE LA EVACUACIÓN DE AGUAS PLUVIALES</b>	DISTRITO: AYACUCHO	CARLOS ANDRÉ AYON HURTADO DANNY DANIEL VILCA FELIX	DRA. IRIS VIOLETA DOMINGUEZ TALAVERA	Cuencas de aporte a la Zona de estudio 1 (Plaza Mayor)	PROYECCIÓN: UTM	1 / 5 500
		PROVINCIA: HUAMANGA				COORDENADAS: UTM-84	FECHA:
		REGIÓN: AYACUCHO					Mayo - 2025

ANEXO 06: AREAS DE APORTE PLUVIAL CERRO LA PICOTA



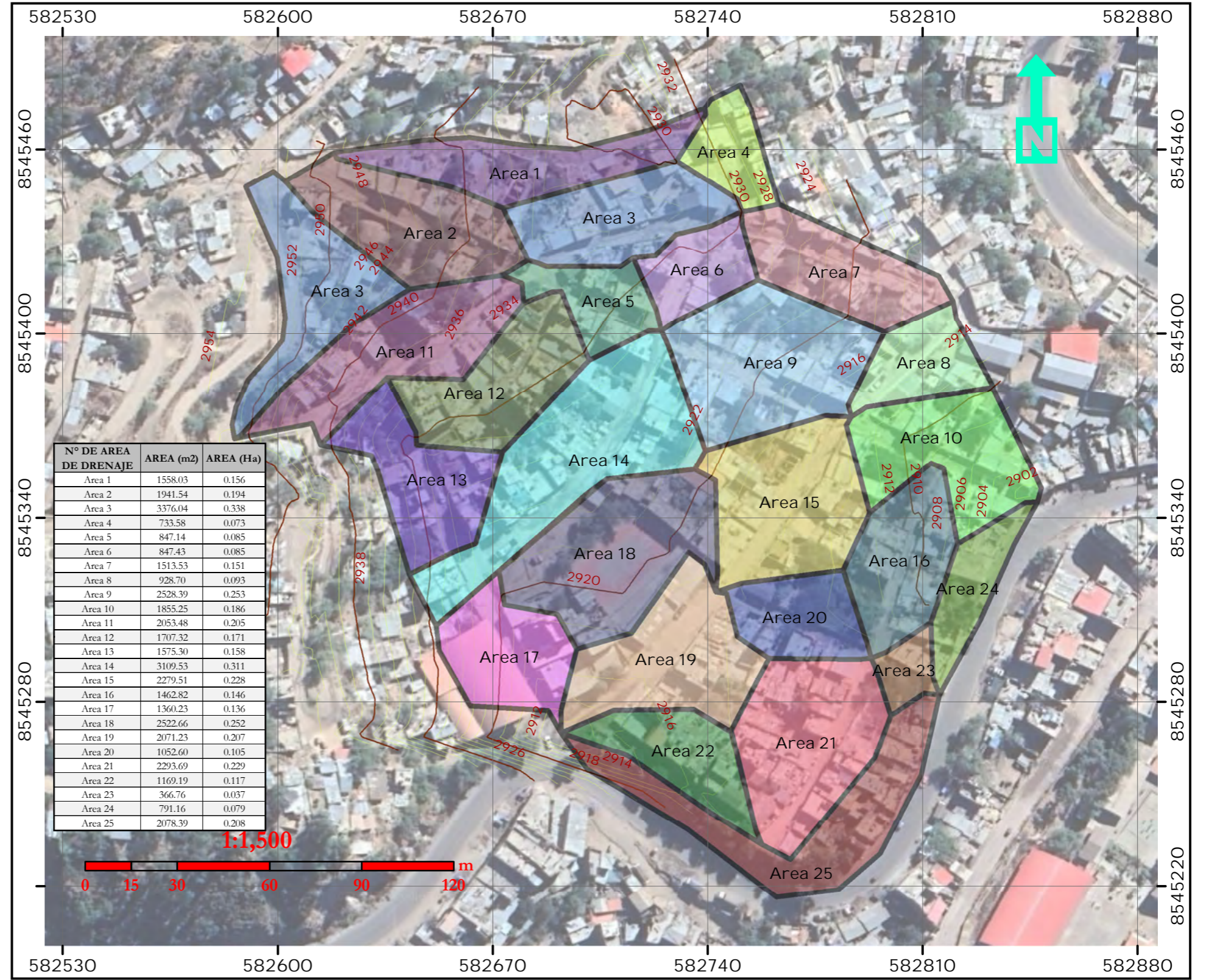
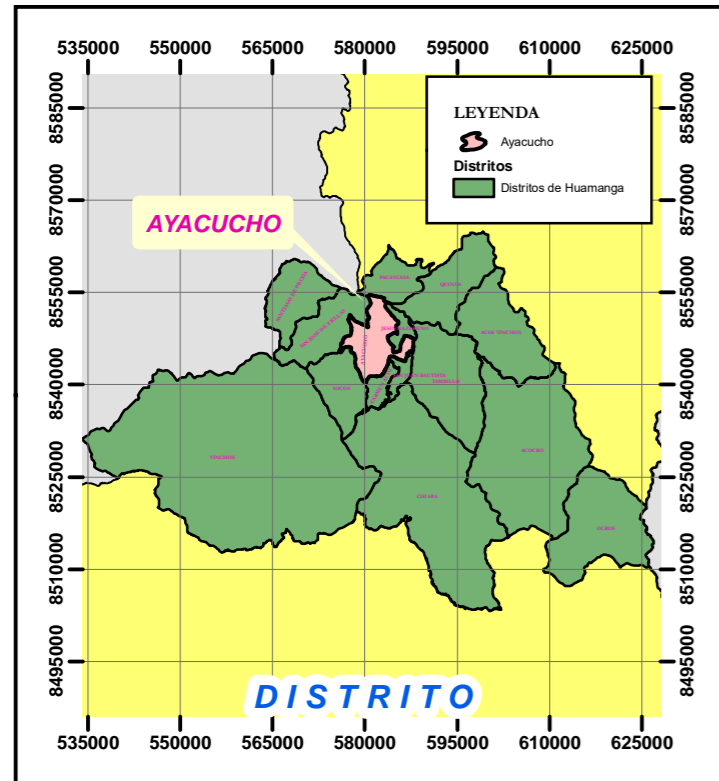
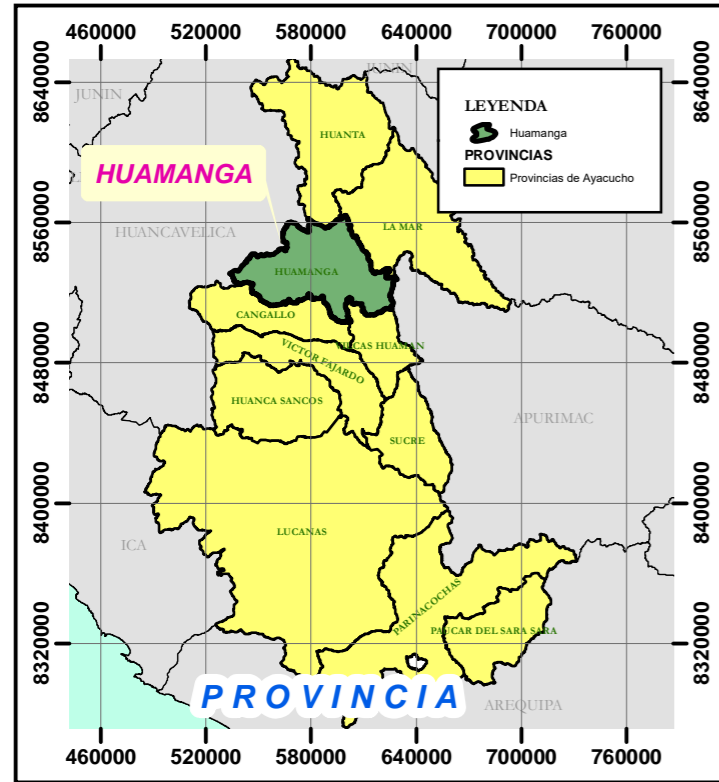
	NOMBRE DE LA TESIS	UBICACIÓN	ALUMNOS:	ASESORA:	PLANO:	SISTEMA DE COORDENADAS	ESCALA
	<b>APLICACIÓN DE TÉCNICAS DE DRENaje URBANO SOSTENIBLE EN LA REGIÓN DE AYACUCHO PARA EL MEJORAMIENTO DE LA EVACUACIÓN DE AGUAS PLUVIALES</b>	DISTRITO: AYACUCHO	CARLOS ANDRÉ AYON HURTADO DANNY DANIEL VILCA FELIX	DRA. IRIS VIOLETA DOMINGUEZ TALAVERA	Cuencas de aporte a la Zona de estudio 2 (La Picota)	PROYECCIÓN: UTM	1 / 2 500
		PROVINCIA: HUAMANGA				COORDENADAS: UTM-84	FECHA: Mayo - 2025
REGIÓN: AYACUCHO							

ANEXO 07: AREAS DE DREANAJE PLUVIAL PLAZA MAYOR DE HUMANGA

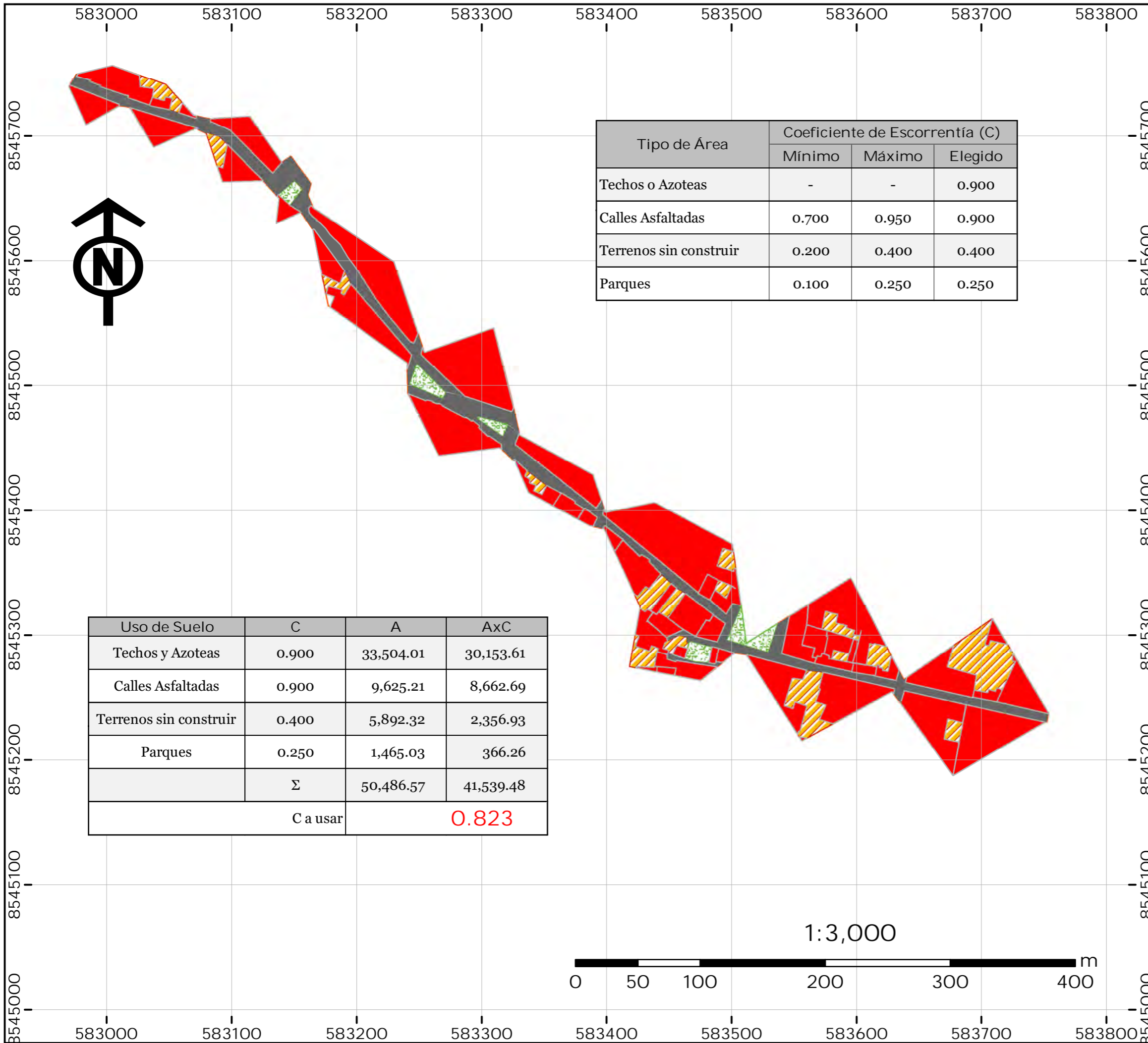


	NOMBRE DE LA TESIS	UBICACIÓN	ALUMNOS:	ASESORA:	PLANO:	SISTEMA DE COORDENADAS	ESCALA
	<b>APLICACIÓN DE TÉCNICAS DE DREANAJE URBANO SOSTENIBLE EN LA REGIÓN DE AYACUCHO PARA EL MEJORAMIENTO DE LA EVACUACIÓN DE AGUAS PLUVIALES</b>	DISTRITO: AYACUCHO	CARLOS ANDRÉ AYON HURTADO DANNY DANIEL VILCA FELIX	DRA. IRIS VIOLETA DOMINGUEZ TALAVERA	Área de Drenaje de la Zona de estudio 1 (Plaza mayor)	PROYECCIÓN: UTM	1 / 2 500
		PROVINCIA: HUAMANGA				COORDENADAS: UTM-84	FECHA: Mayo - 2025
REGIÓN: AYACUCHO							

ANEXO 08: AREAS DE DREANAJE PLUVIAL CERRO LA PICOTA



	NOMBRE DE LA TESIS	UBICACIÓN	ALUMNOS:	ASESORA:	PLANO:	SISTEMA DE COORDENADAS	ESCALA
	<b>APLICACIÓN DE TÉCNICAS DE DREAJE URBANO SOSTENIBLE EN LA REGIÓN DE AYACUCHO PARA EL MEJORAMIENTO DE LA EVACUACIÓN DE AGUAS PLUVIALES</b>	DISTRITO: AYACUCHO	CARLOS ANDRÉ AYON HURTADO DANNY DANIEL VILCA FELIX	DRA. IRIS VIOLETA DOMINGUEZ TALAVERA	Área de Drenaje de la Zona de estudio 2 (Cerro la Picota)	PROYECCIÓN: UTM	1 / 1 500
		PROVINCIA: HUAMANGA				COORDENADAS: UTM-84	FECHA: Mayo - 2025
REGION: AYACUCHO							



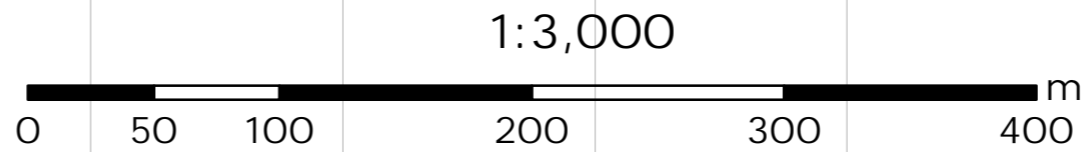
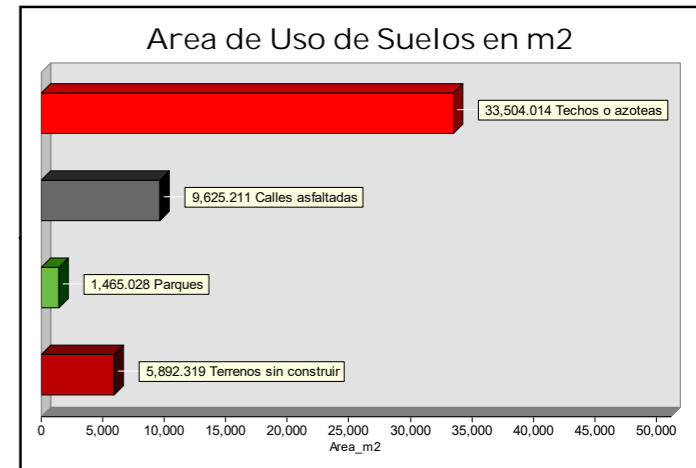
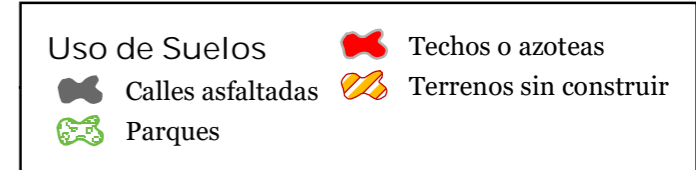
Tipo de Área	Coeficiente de Escorrentía (C)		
	Mínimo	Máximo	Elegido
Techos o Azoteas	-	-	0.900
Calles Asfaltadas	0.700	0.950	0.900
Terrenos sin construir	0.200	0.400	0.400
Parques	0.100	0.250	0.250

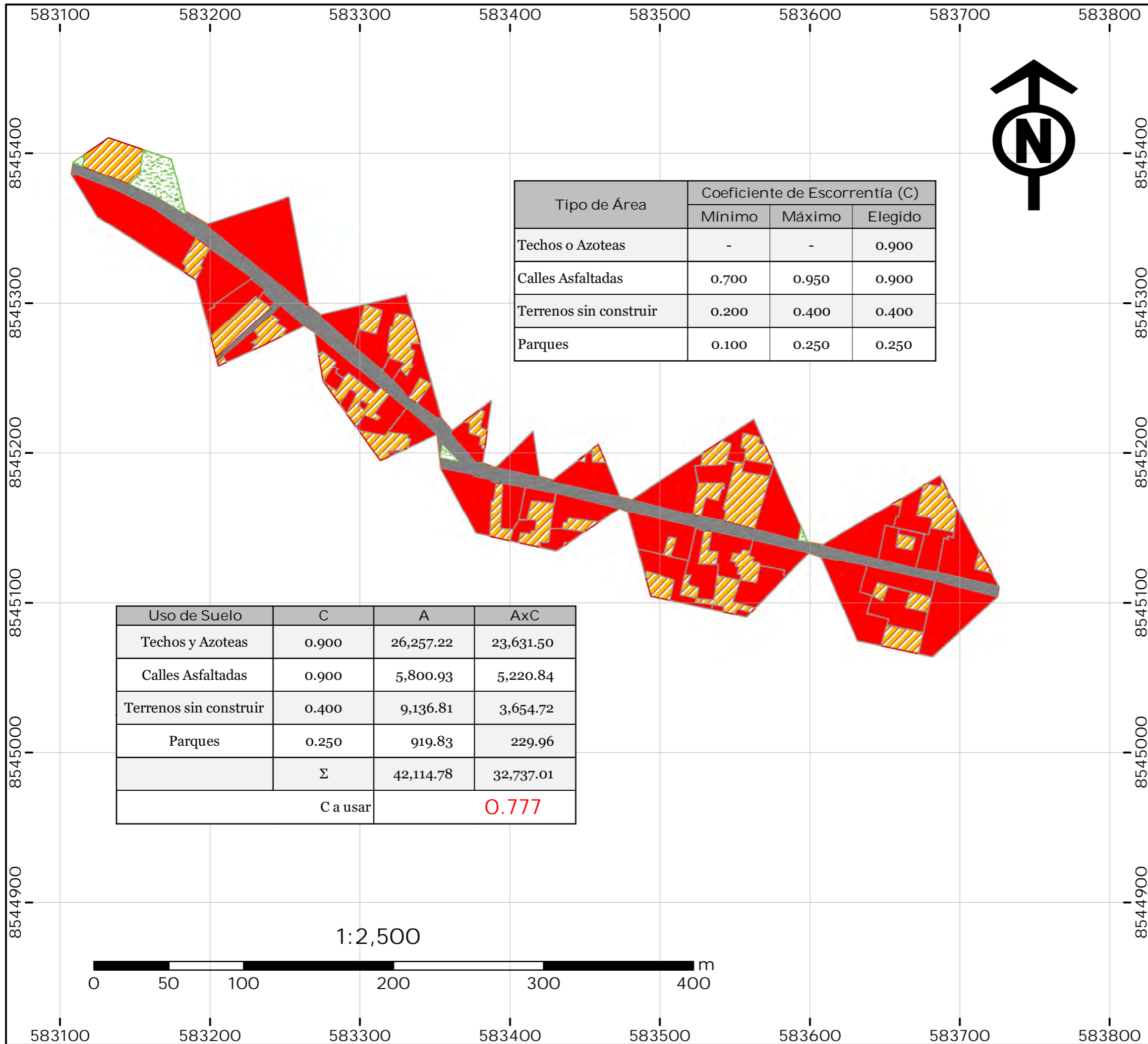
Uso de Suelo	C	A	AxC
Techos y Azoteas	0.900	33,504.01	30,153.61
Calles Asfaltadas	0.900	9,625.21	8,662.69
Terrenos sin construir	0.400	5,892.32	2,356.93
Parques	0.250	1,465.03	366.26
	Σ	50,486.57	41,539.48
	C a usar		<b>0.823</b>

MAPA DE UBICACION DISTRITAL



LEYENDA





Tipo de Área	Coeficiente de Escorrentía (C)		
	Mínimo	Máximo	Elegido
Techos o Azoteas	-	-	0.900
Calles Asfaltadas	0.700	0.950	0.900
Terrenos sin construir	0.200	0.400	0.400
Parques	0.100	0.250	0.250

Uso de Suelo	C	A	AxC
Techos y Azoteas	0.900	26,257.22	23,631.50
Calles Asfaltadas	0.900	5,800.93	5,220.84
Terrenos sin construir	0.400	9,136.81	3,654.72
Parques	0.250	919.83	229.96
	Σ	42,114.78	32,737.01
	C a usar		<b>0.777</b>



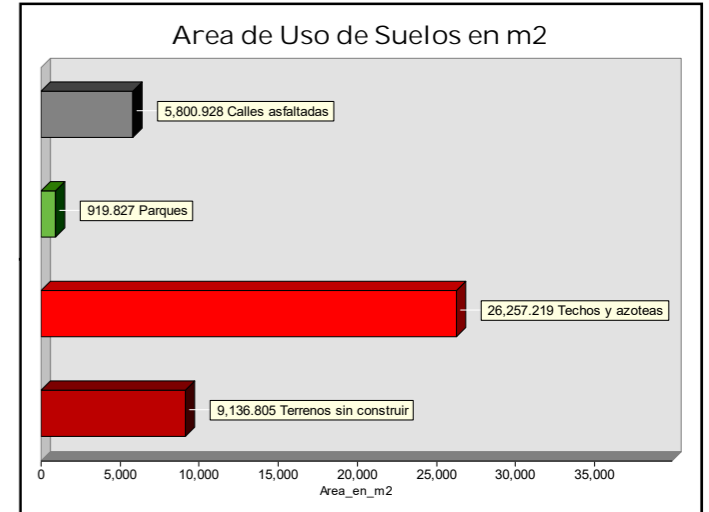
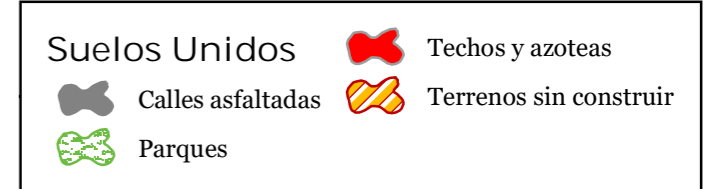
1:2,500

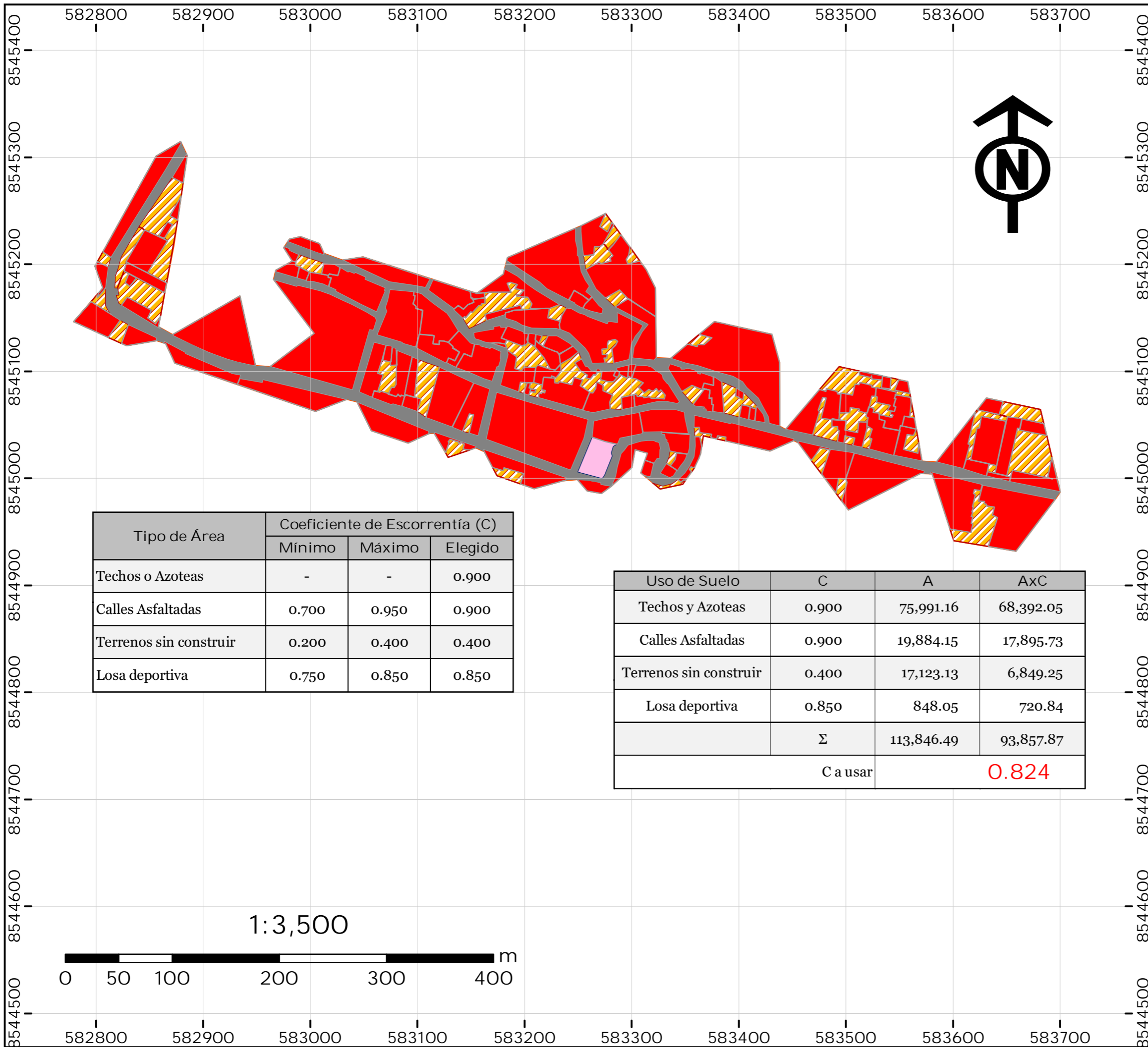
MAPA DE UBICACION DISTRITAL



DISTRITO

LEYENDA

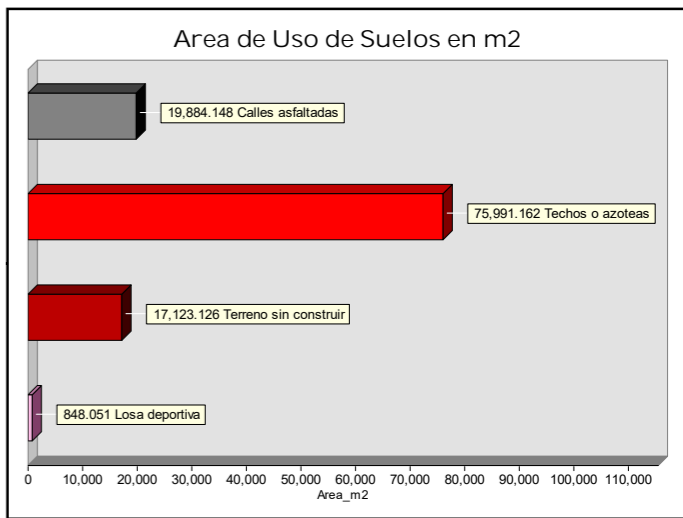
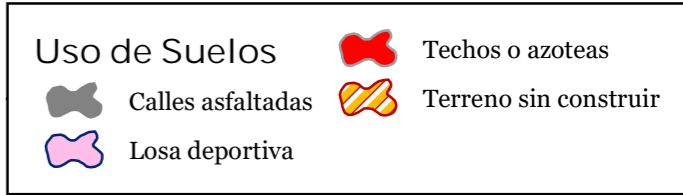




MAPA DE UBICACION DISTRITAL



LEYENDA

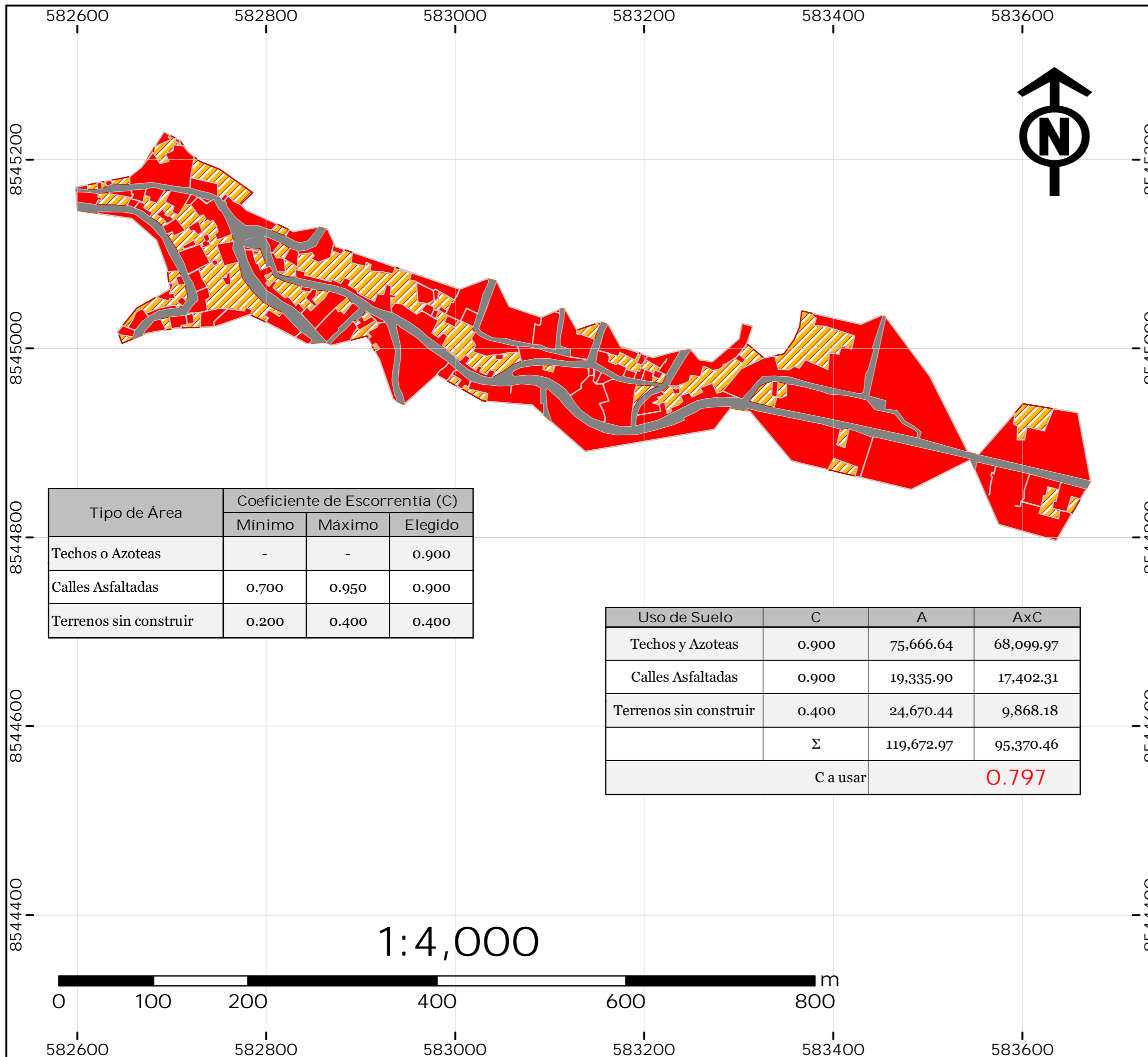


Tipo de Área	Coeficiente de Escorrentía (C)		
	Mínimo	Máximo	Elegido
Techos o Azoteas	-	-	0.900
Calles Asfaltadas	0.700	0.950	0.900
Terrenos sin construir	0.200	0.400	0.400
Losa deportiva	0.750	0.850	0.850

Uso de Suelo	C	A	AxC
Techos y Azoteas	0.900	75,991.16	68,392.05
Calles Asfaltadas	0.900	19,884.15	17,895.73
Terrenos sin construir	0.400	17,123.13	6,849.25
Losa deportiva	0.850	848.05	720.84
	Σ	113,846.49	93,857.87
	C a usar		<b>0.824</b>

1:3,500





MAPA DE UBICACION DISTRITAL

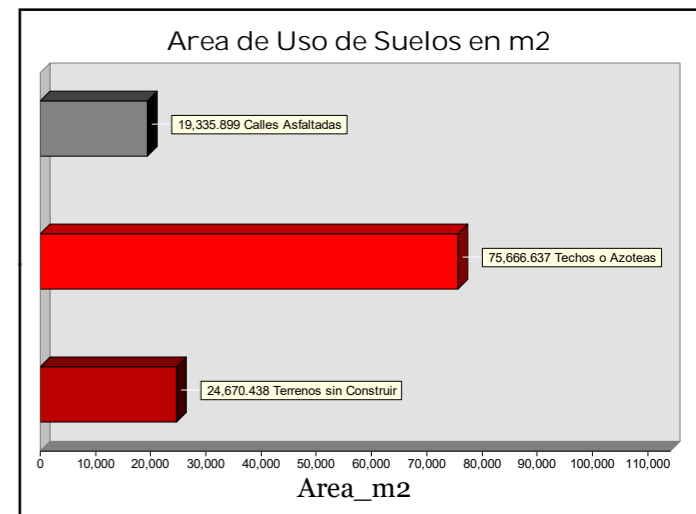


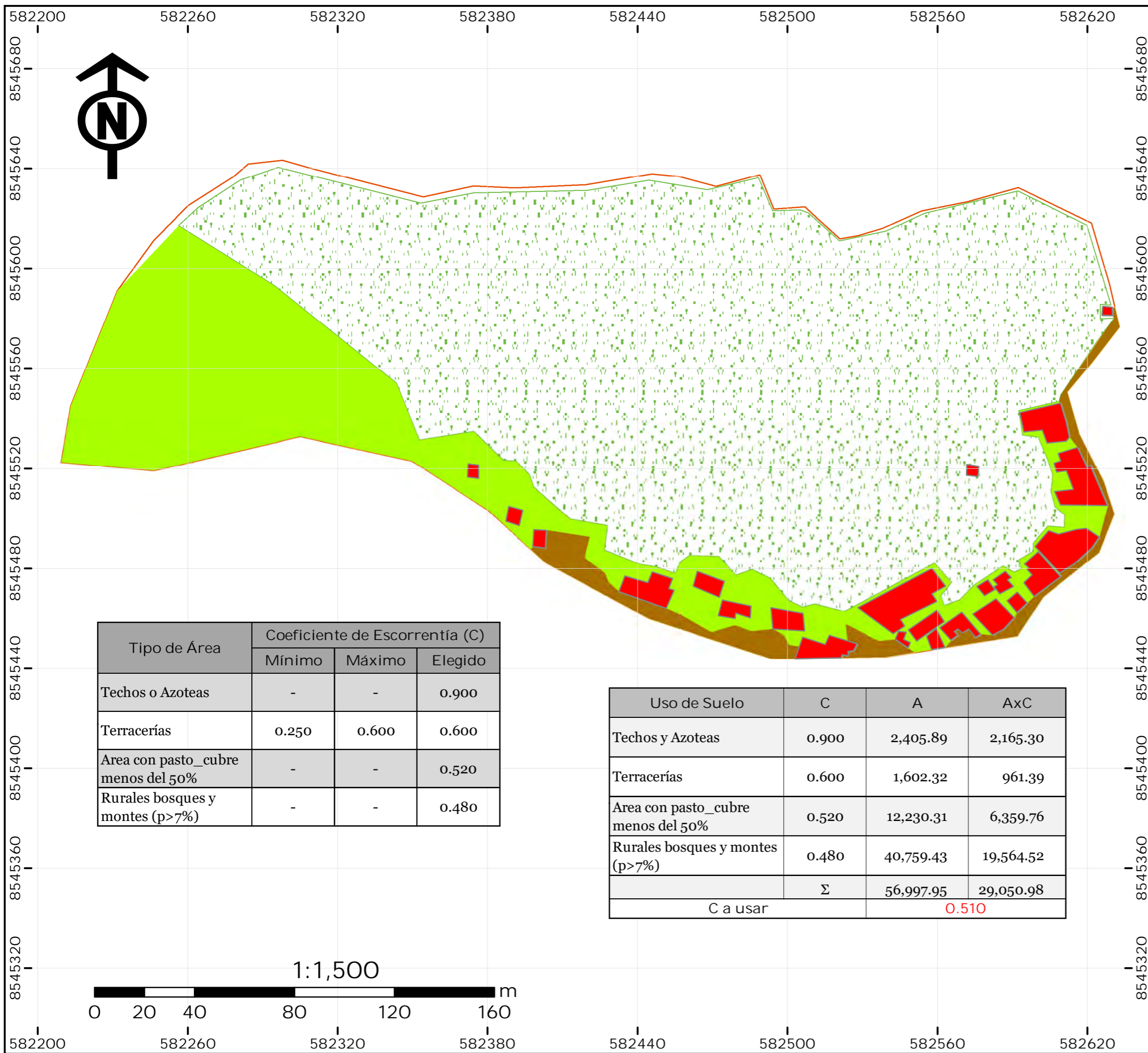
LEYENDA



Tipo de Área	Coeficiente de Escorrentía (C)		
	Mínimo	Máximo	Elegido
Techos o Azoteas	-	-	0.900
Calles Asfaltadas	0.700	0.950	0.900
Terrenos sin construir	0.200	0.400	0.400

Uso de Suelo	C	A	AxC
Techos y Azoteas	0.900	75,666.64	68,099.97
Calles Asfaltadas	0.900	19,335.90	17,402.31
Terrenos sin construir	0.400	24,670.44	9,868.18
	$\Sigma$	119,672.97	95,370.46
	C a usar		<b>0.797</b>

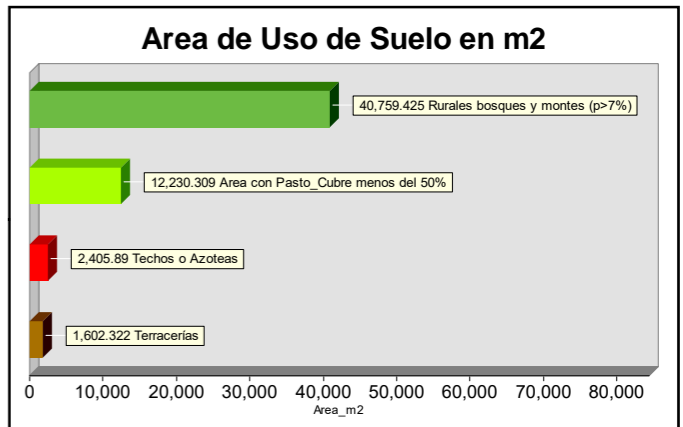
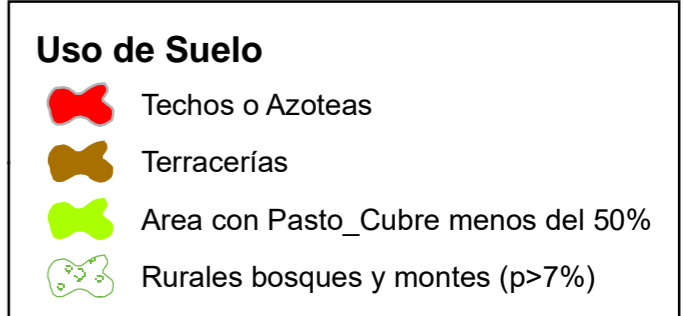




MAPA DE UBICACION DISTRITAL

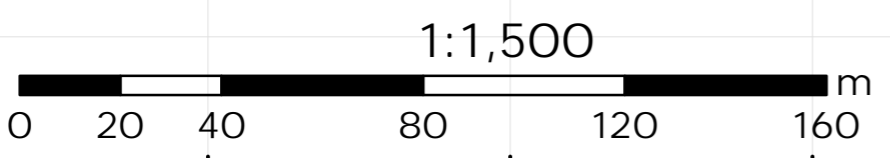


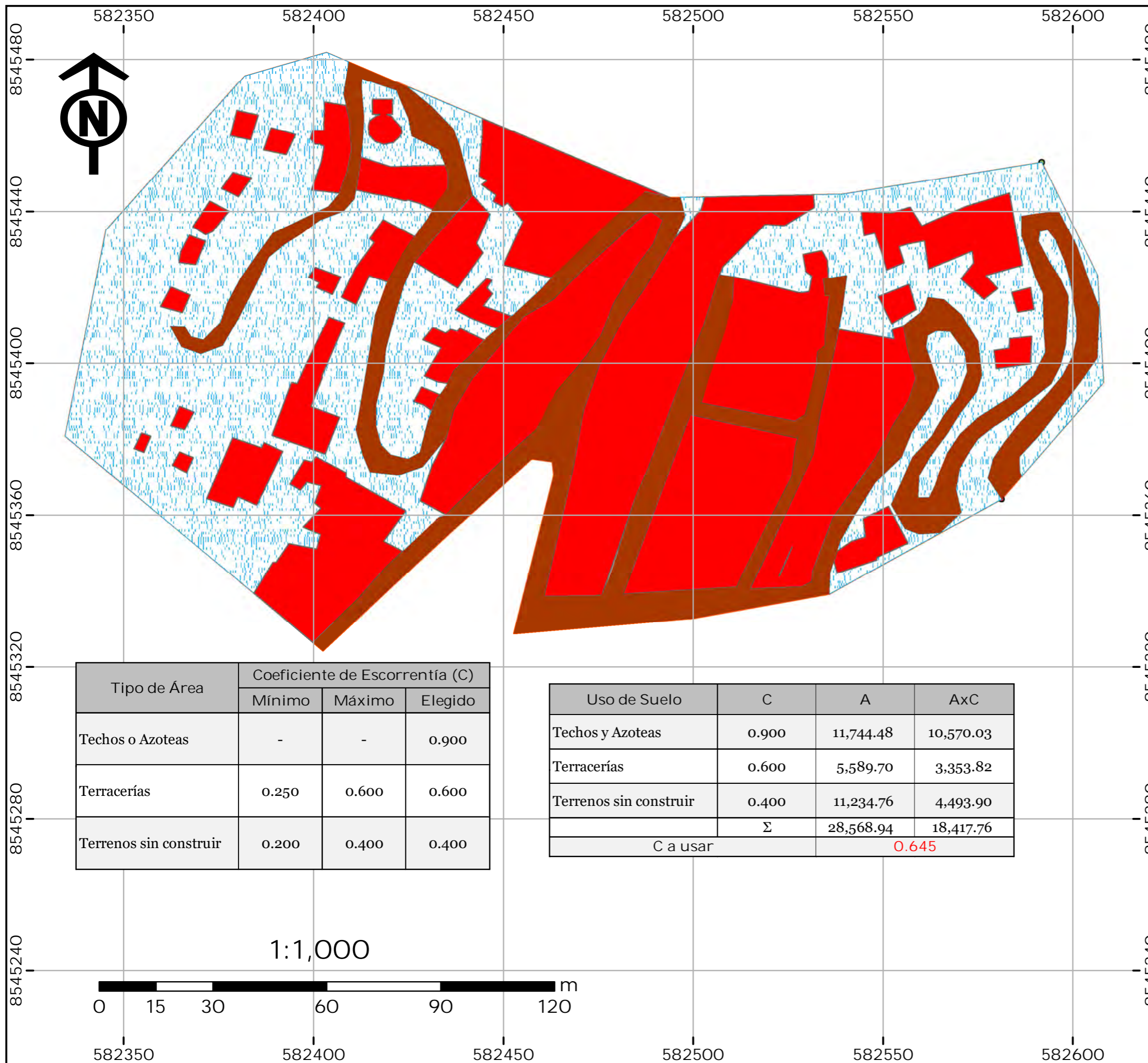
LEYENDA



Tipo de Área	Coeficiente de Escorrentía (C)		
	Mínimo	Máximo	Elegido
Techos o Azoteas	-	-	0.900
Terracerías	0.250	0.600	0.600
Area con pasto_cubre menos del 50%	-	-	0.520
Rurales bosques y montes (p>7%)	-	-	0.480

Uso de Suelo	C	A	AxC
Techos y Azoteas	0.900	2,405.89	2,165.30
Terracerías	0.600	1,602.32	961.39
Area con pasto_cubre menos del 50%	0.520	12,230.31	6,359.76
Rurales bosques y montes (p>7%)	0.480	40,759.43	19,564.52
	Σ	56,997.95	29,050.98
C a usar			0.510

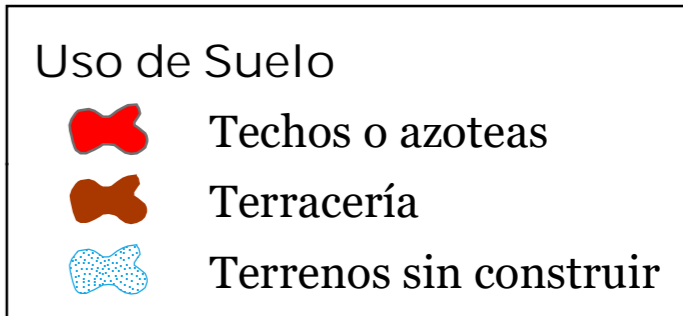




MAPA DE UBICACION DISTRITAL

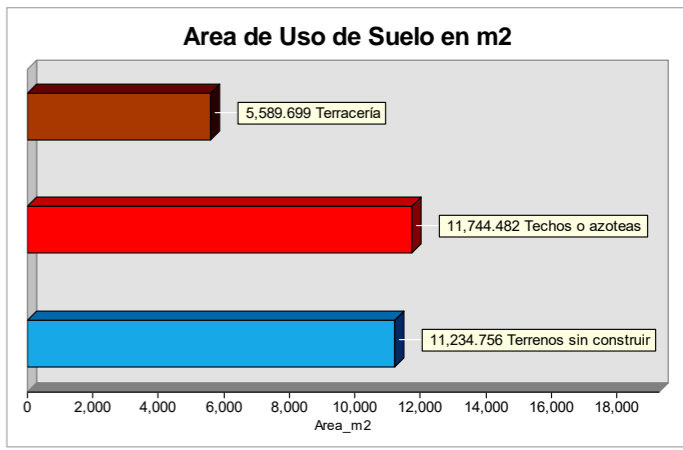


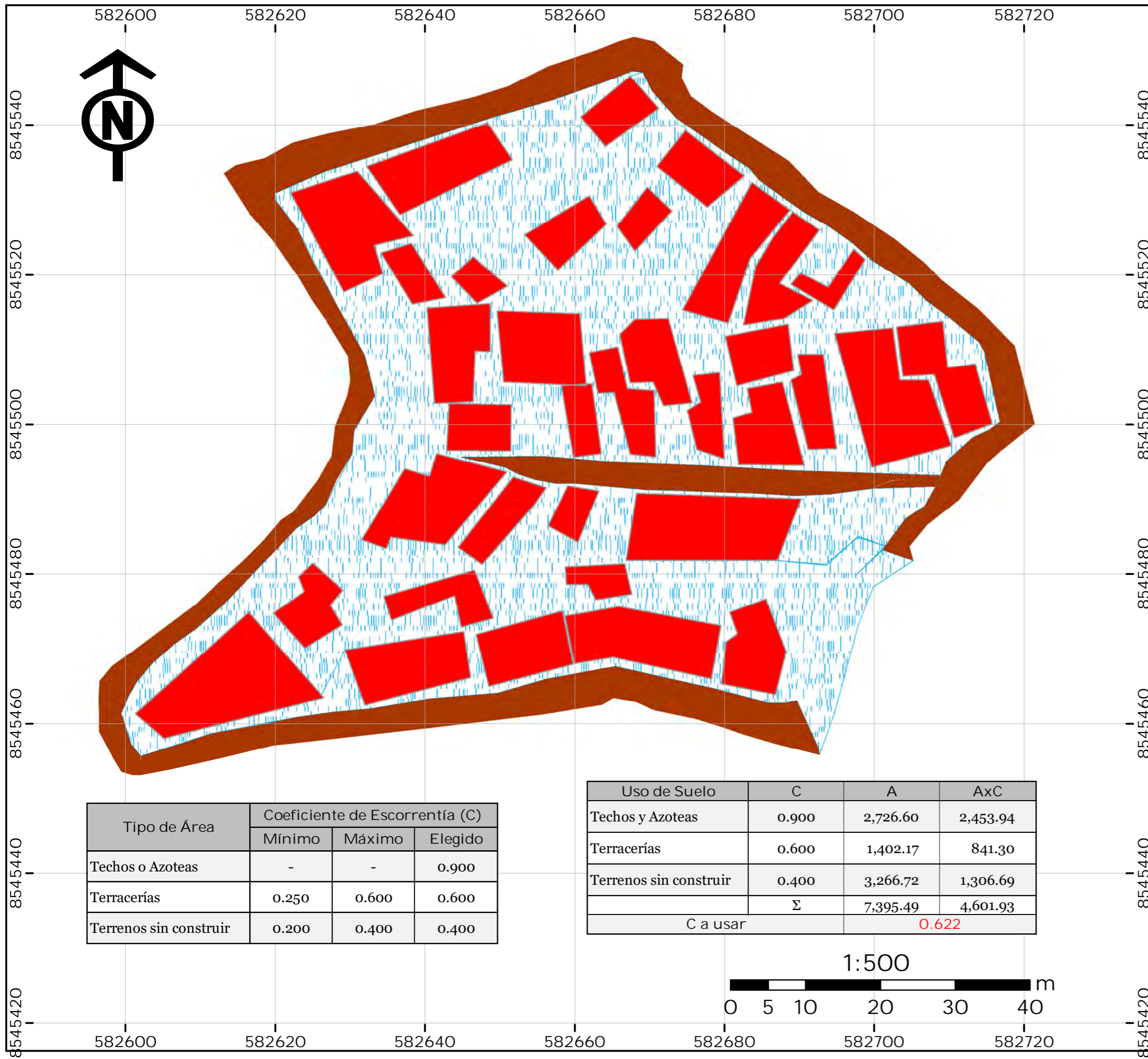
LEYENDA



Tipo de Área	Coeficiente de Escorrentía (C)		
	Mínimo	Máximo	Elegido
Techos o Azoteas	-	-	0.900
Terracerías	0.250	0.600	0.600
Terrenos sin construir	0.200	0.400	0.400

Uso de Suelo	C	A	AxC
Techos y Azoteas	0.900	11,744.48	10,570.03
Terracerías	0.600	5,589.70	3,353.82
Terrenos sin construir	0.400	11,234.76	4,493.90
	$\Sigma$	28,568.94	18,417.76
C a usar		0.645	

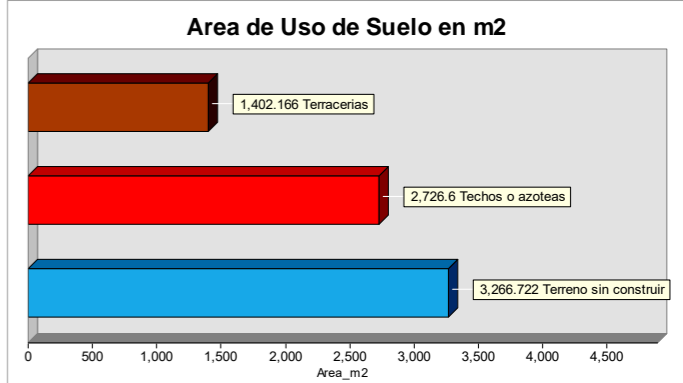
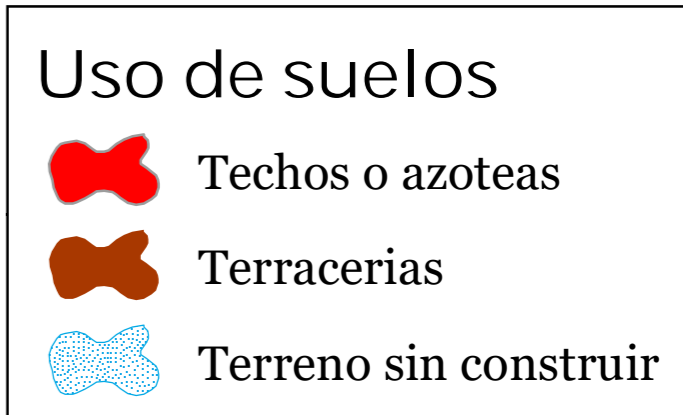




MAPA DE UBICACION DISTRITAL

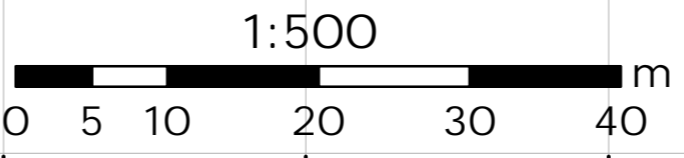


LEYENDA

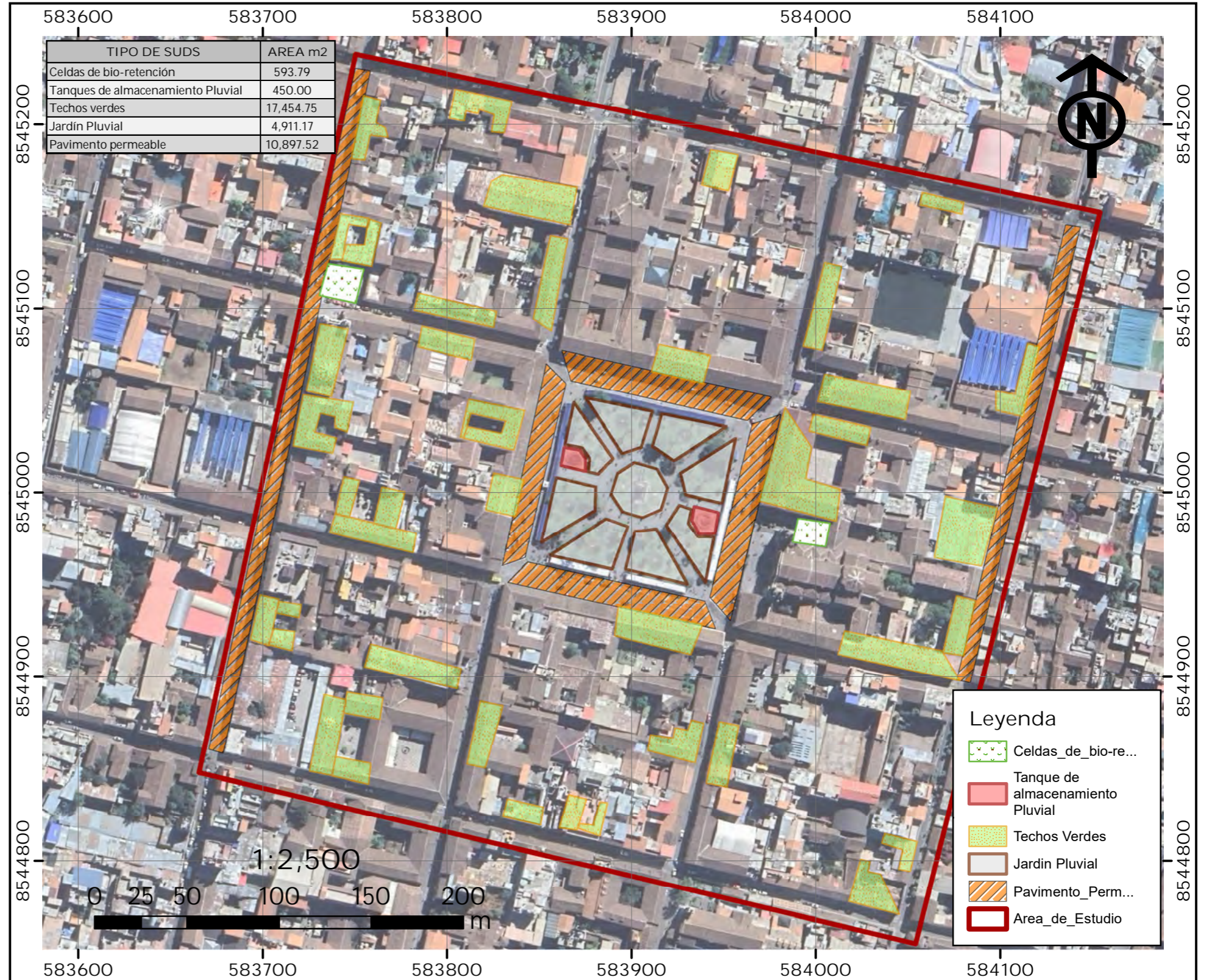
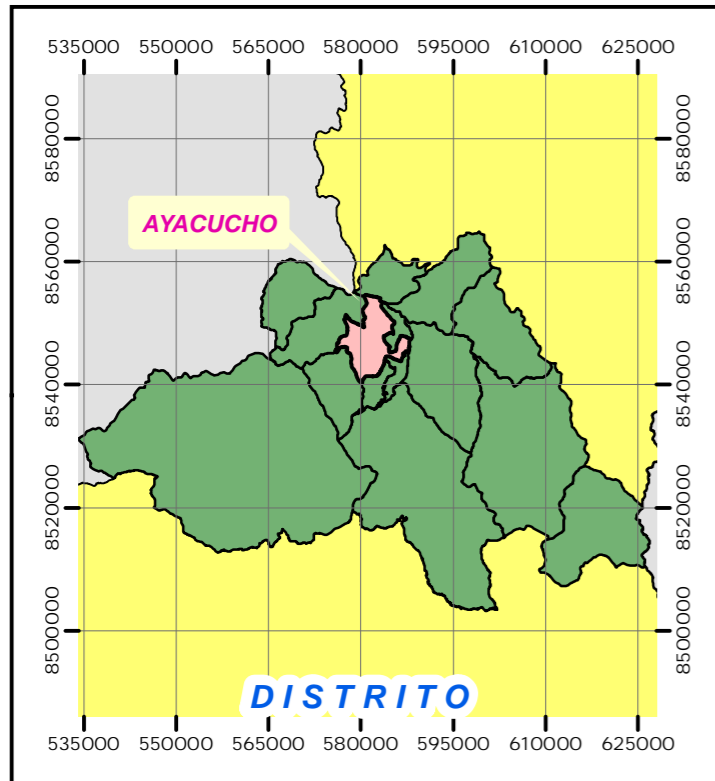


Tipo de Área	Coeficiente de Escorrentía (C)		
	Mínimo	Máximo	Elegido
Techos o Azoteas	-	-	0.900
Terracerías	0.250	0.600	0.600
Terrenos sin construir	0.200	0.400	0.400

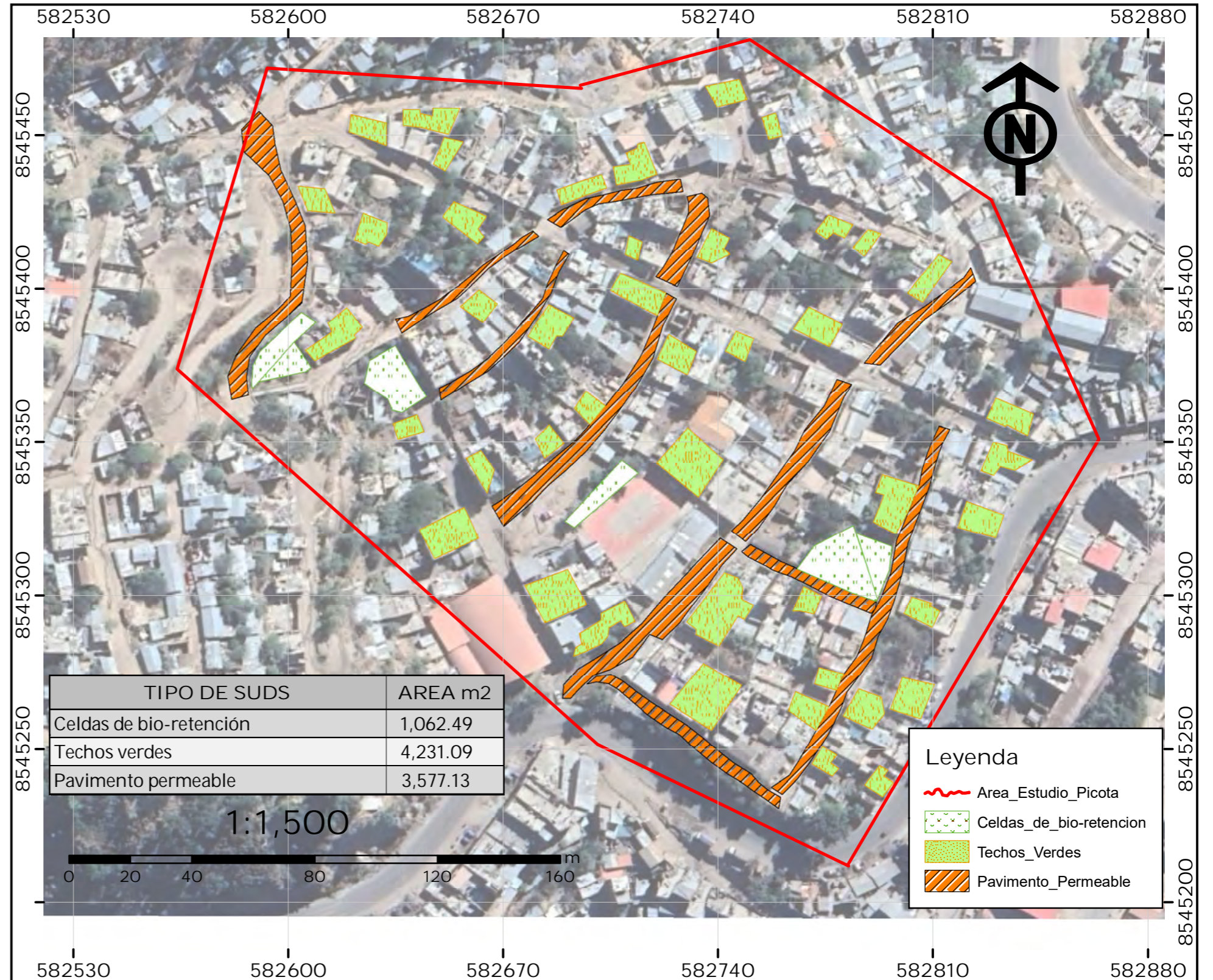
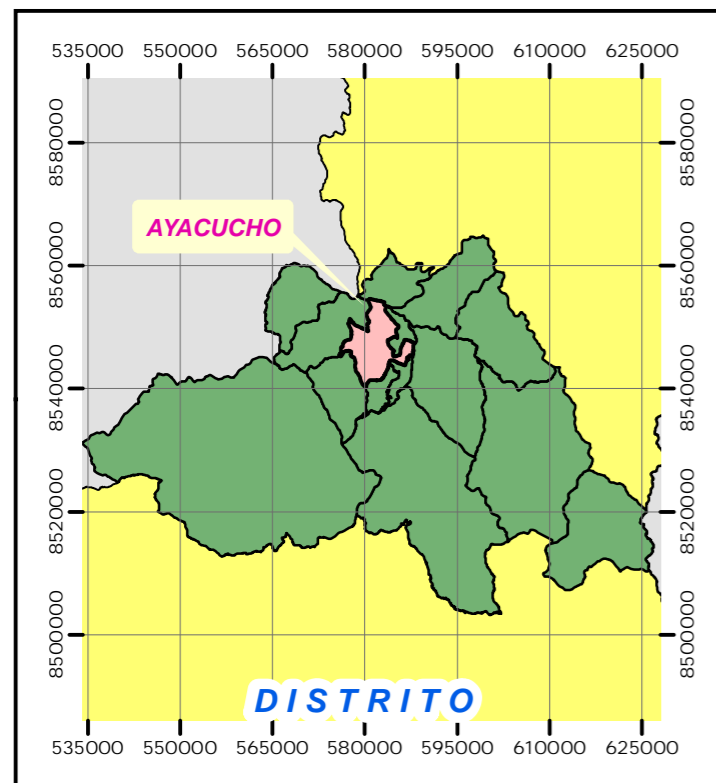
Uso de Suelo	C	A	AxC
Techos y Azoteas	0.900	2,726.60	2,453.94
Terracerías	0.600	1,402.17	841.30
Terrenos sin construir	0.400	3,266.72	1,306.69
	Σ	7,395.49	4,601.93
C a usar		0.622	

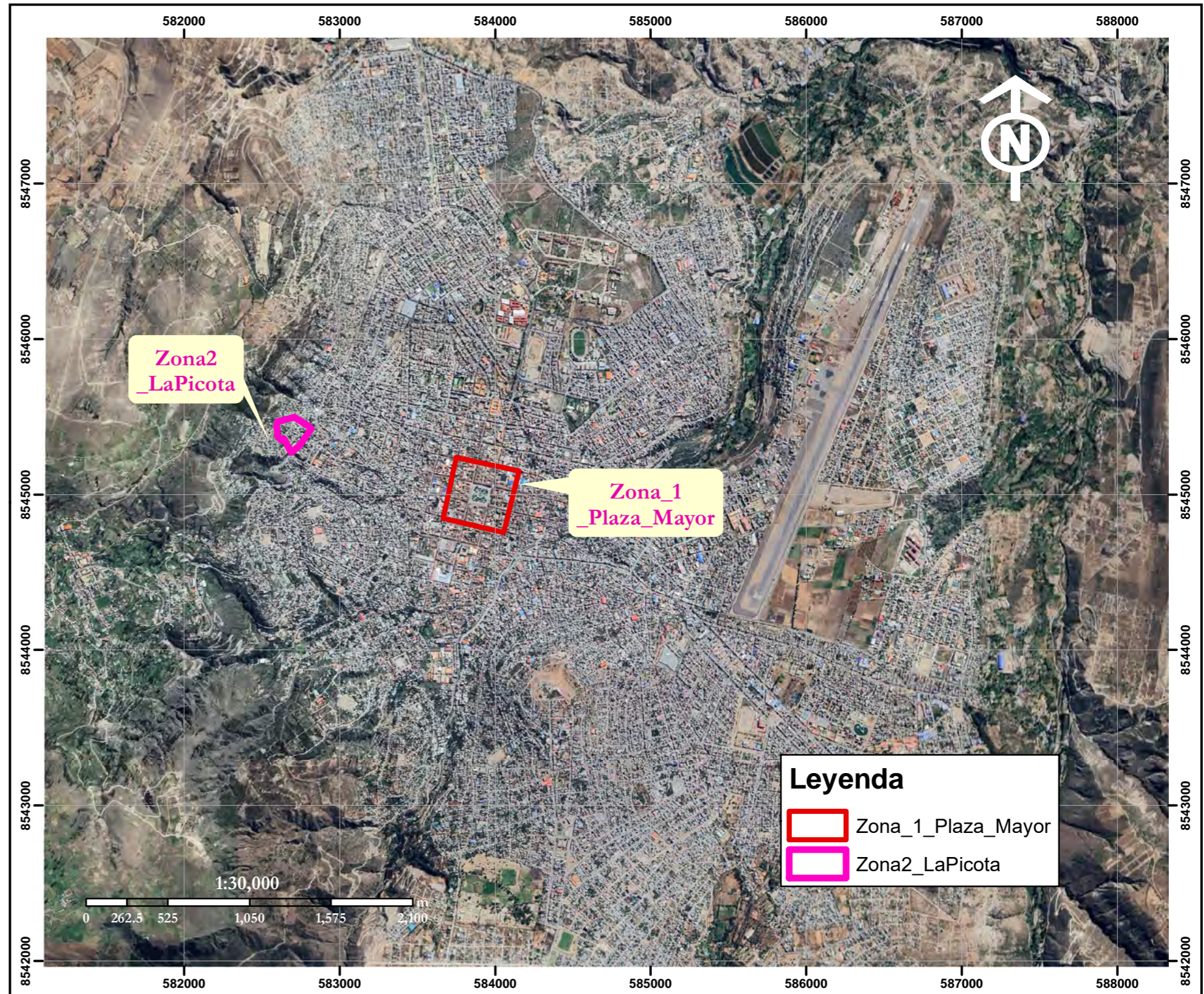
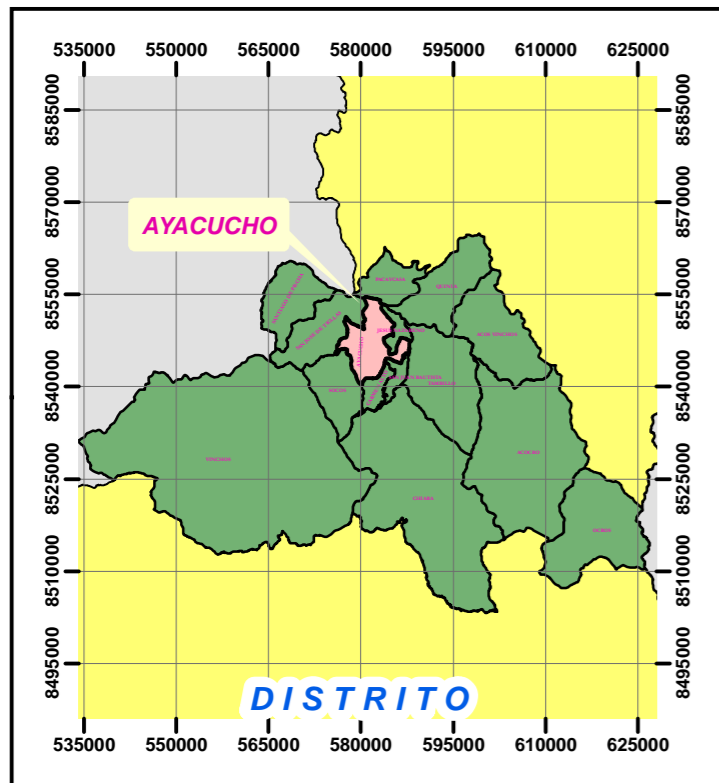
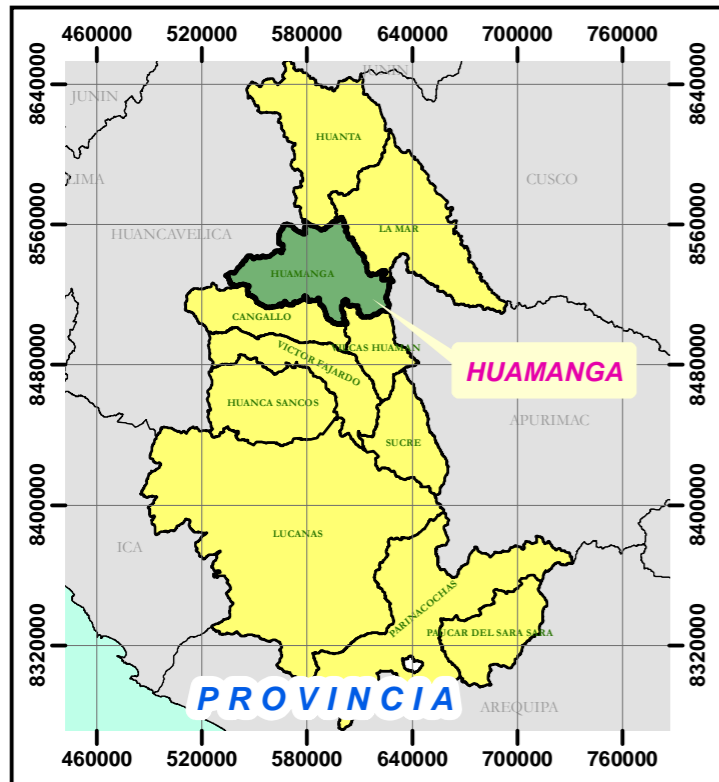


ANEXO 16: MAPA DE PROPUESTAS DE SUDS - PLAZA MAYOR



ANEXO 17: MAPA DE PROPUESTAS DE SUDS - CERRO LA PICOTA





**Leyenda**

- Zona\_1\_Plaza\_Mayor
- Zona2\_LaPicota



NOMBRE DE LA TESIS  
**APLICACIÓN DE TÉCNICAS DE DRENAJE URBANO SOSTENIBLE EN LA REGIÓN DE AYACUCHO PARA EL MEJORAMIENTO DE LA EVACUACIÓN DE AGUAS PLUVIALES**

**UBICACIÓN**  
 DISTRITO: AYACUCHO  
 PROVINCIA: HUAMANGA  
 REGIÓN: AYACUCHO

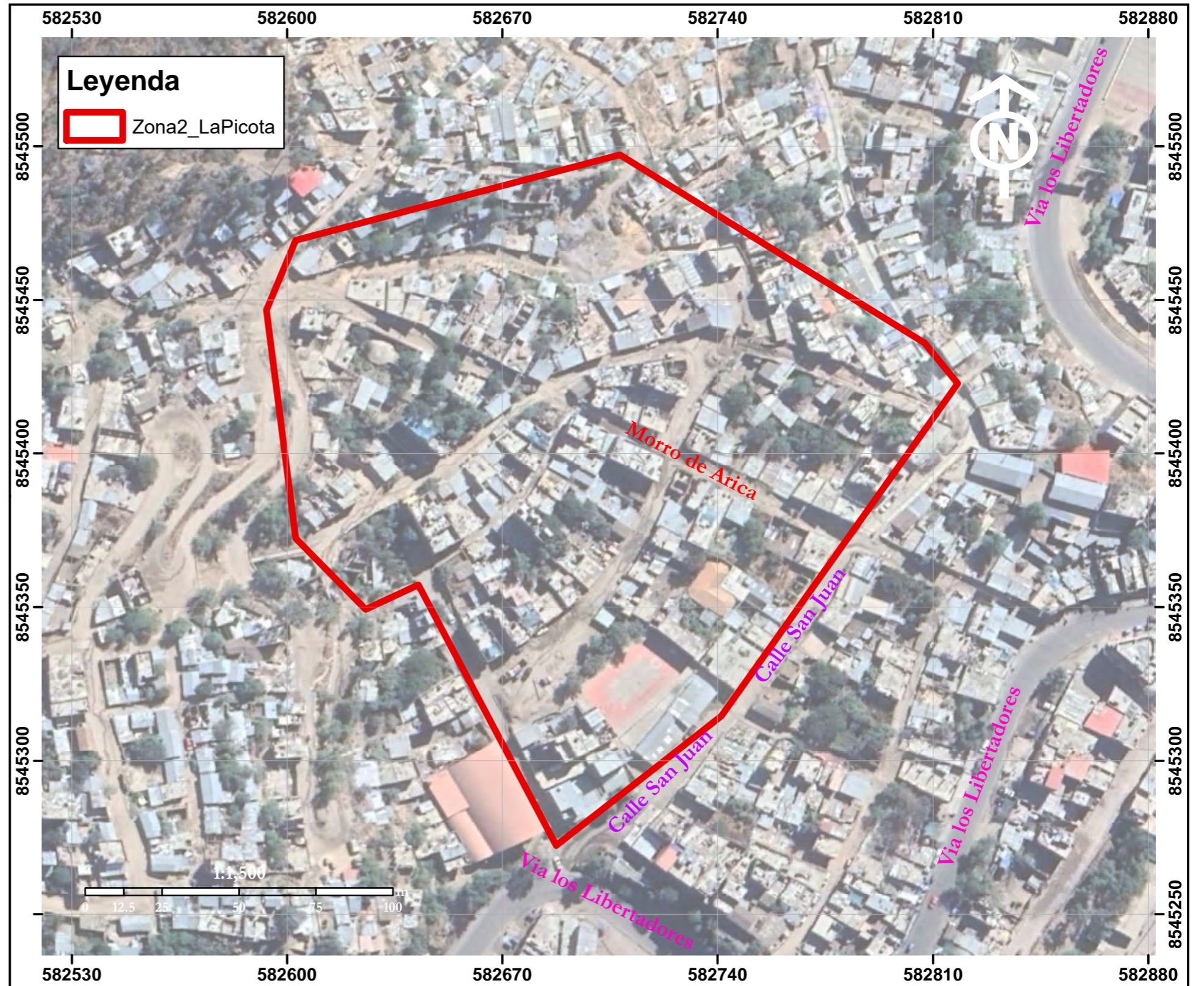
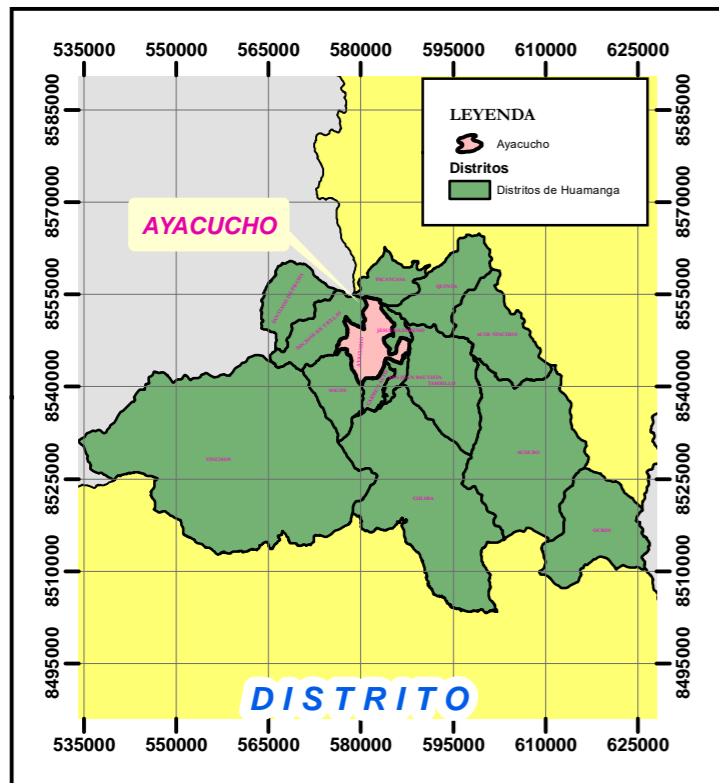
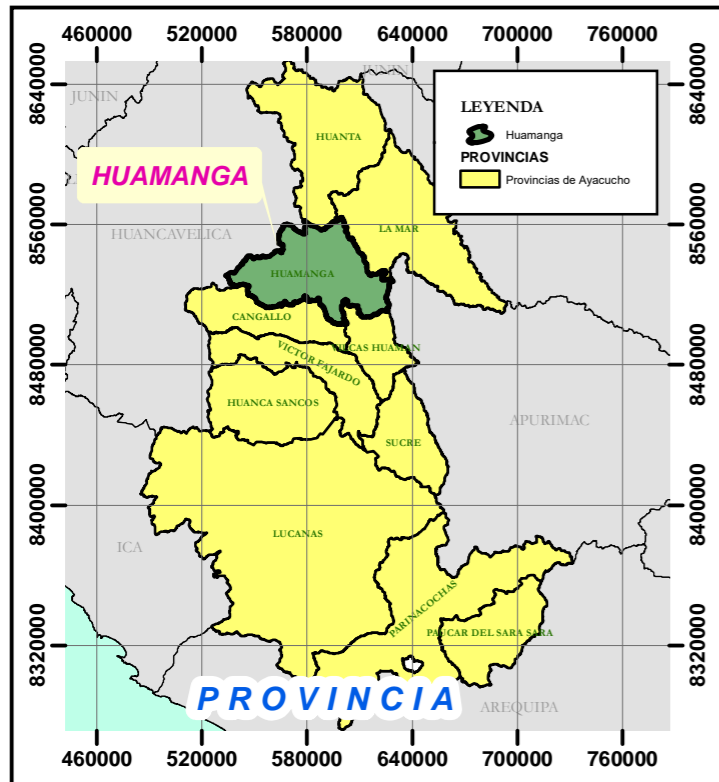
**ALUMNOS:**  
 CARLOS ANDRÉ AYON HURTADO  
 DANNY DANIEL VILCA FELIX

**ASESORA:**  
 DRA. IRIS VIOLETA DOMINGUEZ TALAVERA

**PLANO:**  
 UBICACIÓN DE LA ZONA 2  
 (CERRO LA PICOTA)

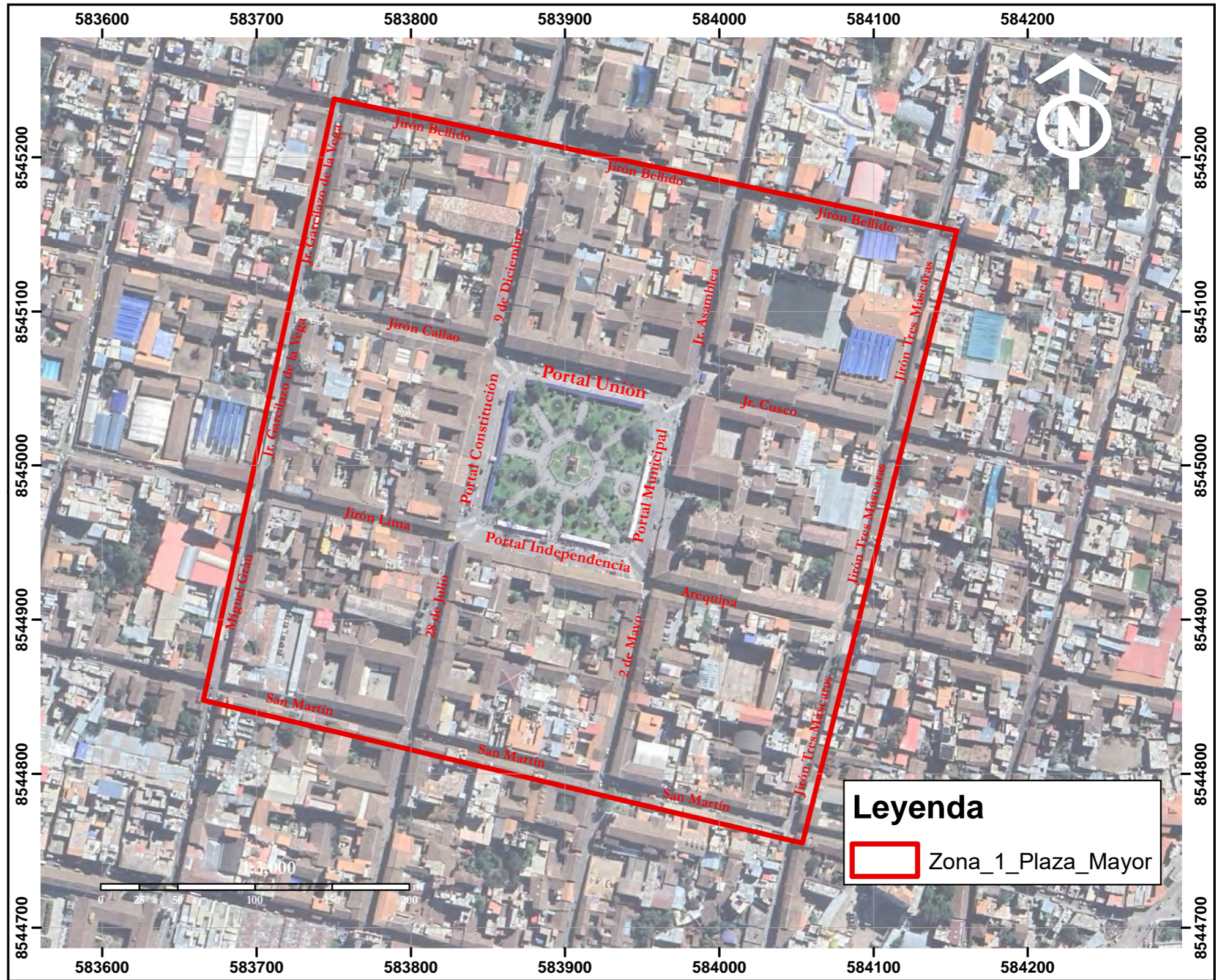
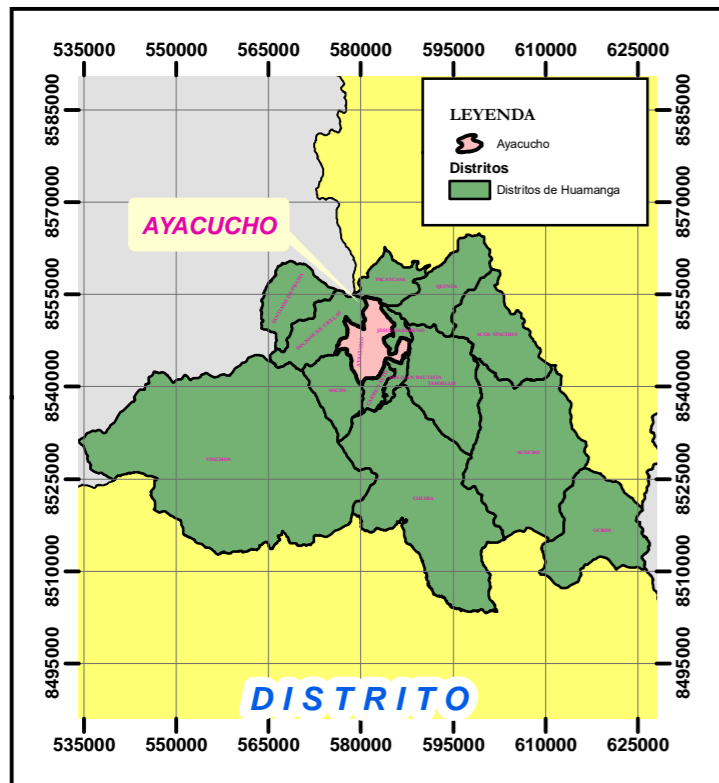
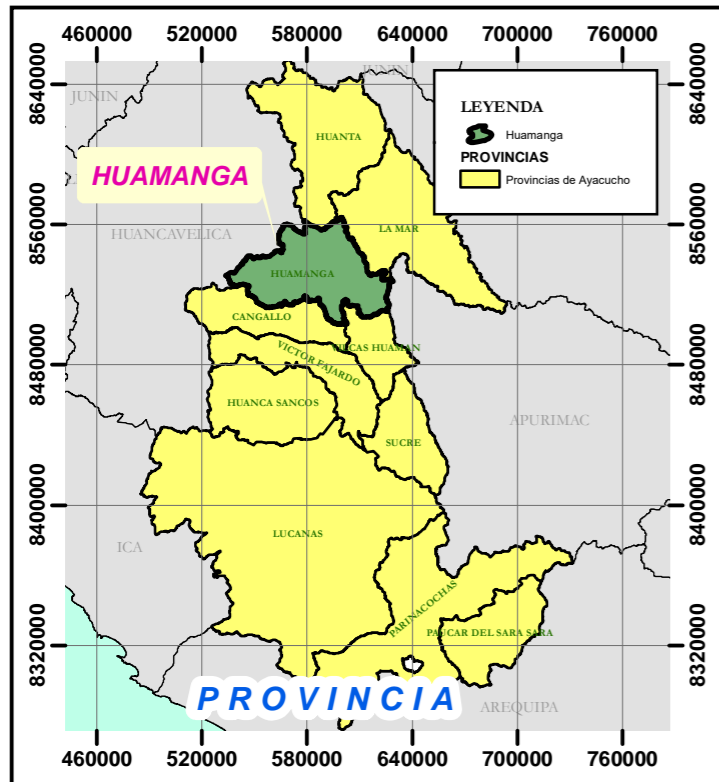
**SISTEMA DE COORDENADAS**  
 PROYECCIÓN: UTM  
 ZONA: 18 Sur  
 COORDENADAS: UTM-84

**ESCALA**  
 1 / 1500  
**FECHA:**  
 Junio - 2023



NOMBRE DE LA TESIS  
**APLICACIÓN DE TÉCNICAS DE DRENAJE URBANO SOSTENIBLE EN DOS ZONAS DE LA CIUDAD DE AYACUCHO PARA EL MEJORAMIENTO DE LA EVACUACIÓN DE AGUAS PLUVIALES**

UBICACIÓN	ALUMNOS:	ASESORA:	PLANO:	SISTEMA DE COORDENADAS	ESCALA
DISTRITO: AYACUCHO	CARLOS ANDRÉ AYON HURTADO DANNY DANIEL VILCA FELIX	DRA. IRIS VIOLETA DOMINGUEZ TALAVERA	UBICACIÓN DE LA ZONA 2 (CERRO LA PICOTA)	PROYECCIÓN: UTM	1 / 1 500
PROVINCIA: HUAMANGA				ZONA: 18 Sur	FECHA:
REGIÓN: AYACUCHO				COORDENADAS: UTM-84	Mayo - 2025



**Leyenda**

Zona\_1\_Plaza\_Mayor



NOMBRE DE LA TESIS  
**APLICACIÓN DE TÉCNICAS DE DRENAJE URBANO SOSTENIBLE EN DOS ZONAS DE LA CIUDAD DE AYACUCHO PARA EL MEJORAMIENTO DE LA EVACUACIÓN DE AGUAS PLUVIALES**

**UBICACIÓN**  
 DISTRITO: AYACUCHO  
 PROVINCIA: HUAMANGA  
 REGIÓN: AYACUCHO

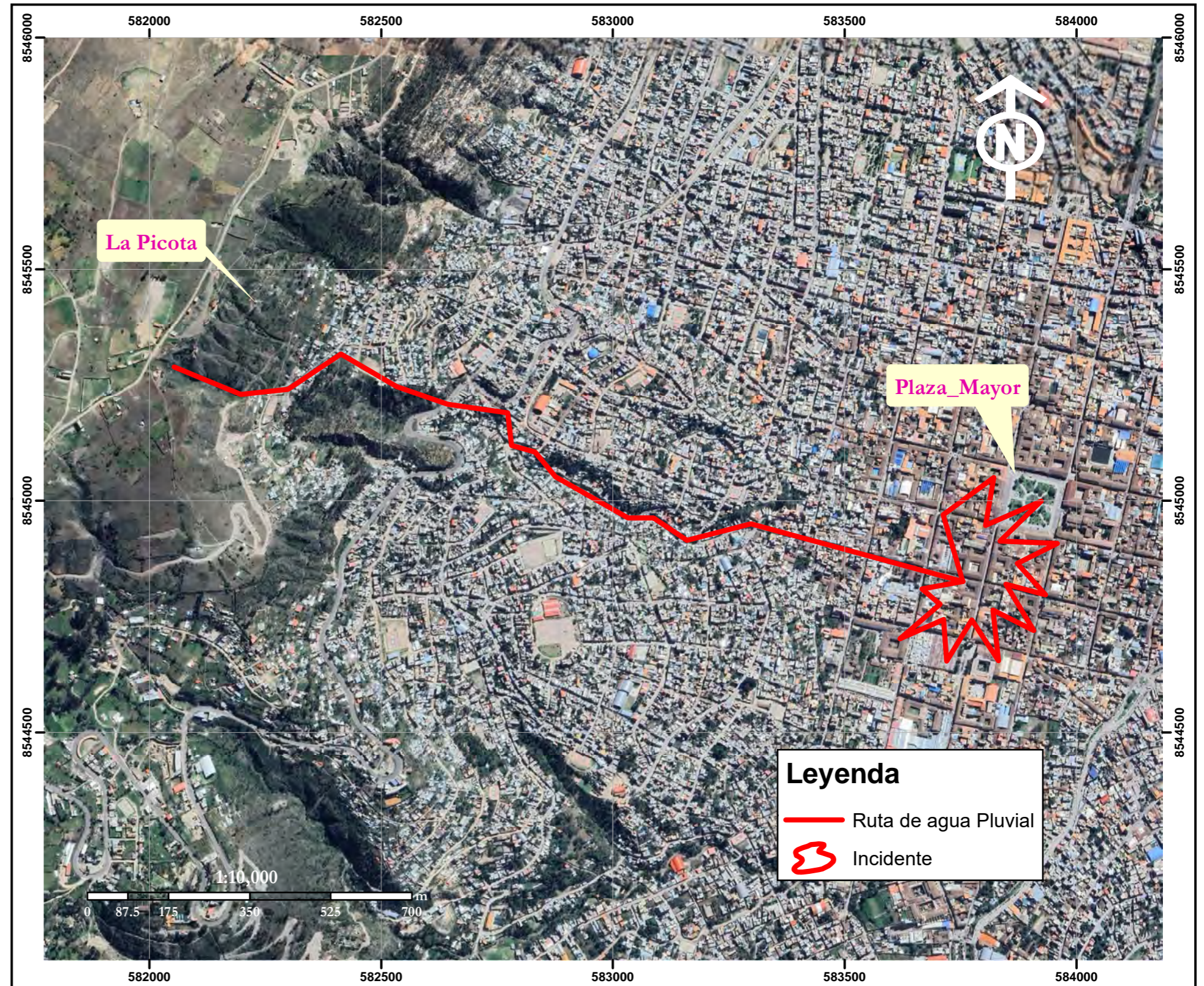
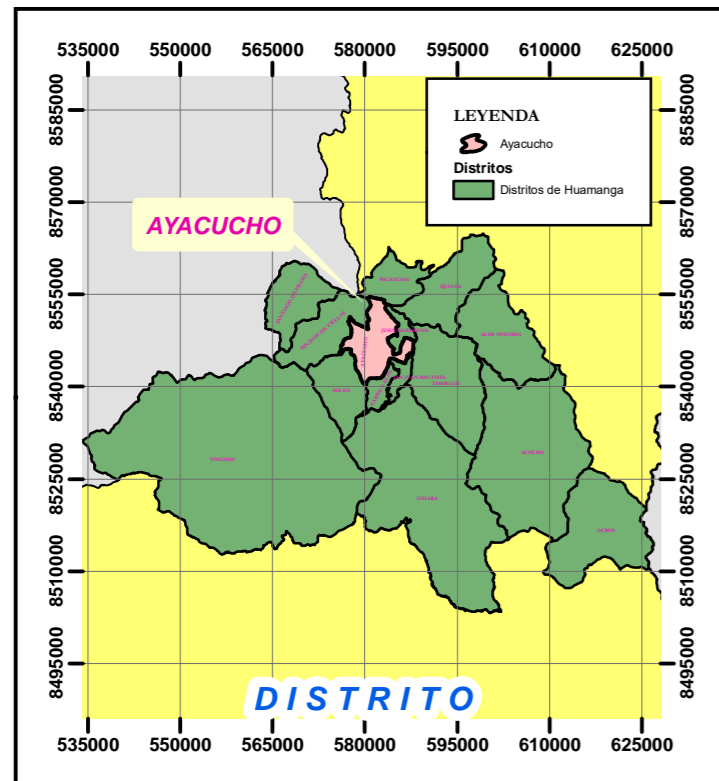
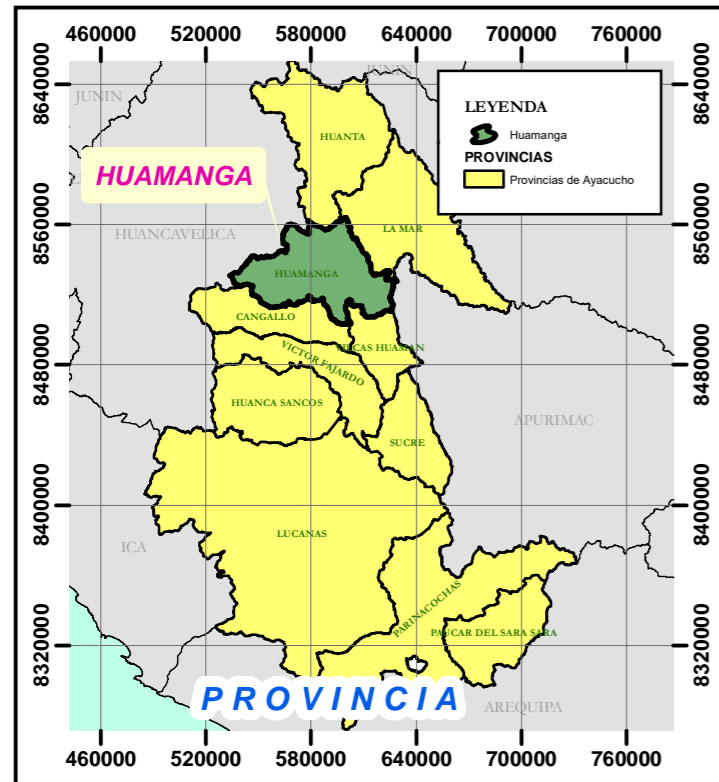
**ALUMNOS:**  
 CARLOS ANDRÉ AYON HURTADO  
 DANNY DANIEL VILCA FELIX

**ASESORA:**  
 DRA. IRIS VIOLETA DOMINGUEZ TALAVERA

**PLANO:**  
 UBICACIÓN DE LA ZONA 1 ( PLAZA MATOR DE HUAMANGA)

**SISTEMA DE COORDENADAS**  
 PROYECCIÓN: UTM  
 ZONA: 18 Sur  
 COORDENADAS: UTM-84

**ESCALA**  
 1 / 1 500  
**FECHA:**  
 Mayo - 2025



	NOMBRE DE LA TESIS <b>APLICACIÓN DE TÉCNICAS DE DRENAJE URBANO SOSTENIBLE EN LA REGIÓN DE AYACUCHO PARA EL MEJORAMIENTO DE LA EVACUACIÓN DE AGUAS PLUVIALES</b>					
	<b>UBICACIÓN</b> DISTRITO: AYACUCHO PROVINCIA: HUAMANGA REGIÓN: AYACUCHO		<b>ALUMNOS:</b> CARLOS ANDRÉ AYON HURTADO DANNY DANIEL VILCA FELIX		<b>ASESORA:</b> DRA. IRIS VIOLETA DOMINGUEZ TALAVERA	
	<b>PLANO:</b> Ruta crítica de área afectada en huaico 2009, Huamanga, Ayacucho		<b>SISTEMA DE COORDENADAS</b> PROYECCIÓN: UTM ZONA: 18 Sur COORDENADAS: UTM-84		<b>ESCALA</b> 1 / 10 000 <b>FECHA:</b> Mayo - 2025	