UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LOS ANDES

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA PROFESIONAL: DE INGENIERÍA CIVIL

Tesis

Generación del mapa del coeficiente de escorrentía “C” a partir del uso del suelo para las ciudades de Abancay y Tamburco - 2025

Asesor:

Msc. Maldonado Mendivil Angel

Autor:

Salas Yalli, Milayda

Para optar el Título Profesional de:

Ingeniero Civil

Abancay-Apurímac-Perú

2026

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LOS ANDES

FACULTAD DE INGENIERIA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA CIVIL

Acta N°: 051

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TÍTULO PROFESIONAL

En la ciudad de Abancay, a los diecisiete (17) días del mes de julio del 2026, siendo las 09: 00 am horas, se reunieron los integrantes del Jurado designado por Resolución Directoral N° 0595-2026-EPIC-FI-UTEA-SA de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería:

Presidente	:	Dra. VERA TEVES, Rosa Marina
Dictaminante	:	Ph.D. VÁSQUEZ RAMÍREZ, Abbon Alex
Replicante	:	Mag. CORNEJO ROSALES, Horacio Fernando Antonio Hassan

Para evaluar la sustentación, en la modalidad de:

☒ Tesis ☐ Trabajo de suficiencia profesional

Titulada: **Generación del mapa de coeficiente de escorrentía "C" a partir del uso del suelo para las ciudades de Abancay y Tamburco - 2025**

Desarrollado por el (los) Bachiller (es):

Br. SALAS YALLI, Milayda

Para optar el Tituló Profesional de:

Ingeniero Civil

Concluido el acto, el Jurado dictaminó que el (la) (los) mencionado(a) (s) bachiller (es) fue (ron) APROBADO(S) ☒ o DESAPROBADO(S) ☐:

Emitiéndose el calificativo final de:

Bachiller	Nota	Detalle (**)
Br. SALAS YALLI, Milayda	13	Aprobado

Siendo las 10:16 horas concluyó la sesión, firmando los integrantes del Jurado.

Presidente: Dra. VERA TEVES, Rosa Marina (.....)

Dictaminante: Ph.D. VÁSQUEZ RAMÍREZ, Abbon Alex (.....)

Replicante: Mag. CORNEJO ROSALES, Horacio Fernando Antonio Hassan (.....)

Nota: Desaprobado: 0-10; **Aprobado:** 11-20

(**): 0 a 10: Desaprobado, 11 a 15: Aprobado, 16 a 18: Aprobado Notable, 19 y 20: Aprobado con Distinción, Art. 18 RGGAT.

17% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- Coincidencias menores (menos de 10 palabras)

Fuentes principales

16% Fuentes de Internet
6% Publicaciones
0% Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

Metadatos Complementarios

Datos del Autor		
Apellidos y nombres	:	Salas Yalli, Milayda
Tipo de Documento de Identidad	:	DNI
Número de Documento de Identidad	:	48352968
URL ORCID	:	https://orcid.org/0009-0009-1855-2819
Datos del Asesor		
Apellidos y nombres	:	Maldonado Mendivil Angel
Tipo de Documento de Identidad	:	DNI
Número de Documento de Identidad	:	06788424
URL ORCID	:	https://orcid.org/0000-0001-9002-1910
Datos de la investigación		
Facultad	:	Ingeniería
Escuela Profesional	:	Ingeniería Civil
Línea de Investigación	:	Gestión de la Infraestructura para el Desarrollo Sostenible
Rango de años en que se realizó la investigación	:	2025
Fuente de financiamiento	:	Autofinanciado
Porcentaje de similitud	:	17%
URL de OCDE		https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.01.01

Dedicatoria

.

Dedico esta Tesis a mis seres queridos, cuyo amor y apoyo inquebrantable han sido mi mayor fuente de inspiración a lo largo de este viaje académico. A mis padres, por su apoyo y confianza en mí. A mi pareja y mis hijos, por su gran cariño y amor. A mis amigos, por su ánimo constante. Este logro es también suyo, y espero que este trabajo contribuya de alguna manera al conocimiento y al bienestar de nuestra sociedad.

Agradecimientos

.

Quiero agradecer a DIOS por permitirme cumplir este logro profesional, así mismo mi sincero agradecimiento a todas las personas que hicieron posible la realización de esta tesis.

En primer lugar, quiero agradecer a mi asesor de tesis el Mg. Ing. Angel Maldonado Mendivil, por su orientación experta, paciencia y apoyo constante a lo largo de este proceso. Sus consejos y comentarios fueron invaluables para dar forma a este trabajo.

Agradezco también profundamente a mi familia por su amor incondicional, comprensión y respaldo durante mi trayectoria académica. Este logro es el resultado del esfuerzo colectivo de muchas personas, y estoy profundamente agradecida por todas las contribuciones que hicieron posible esta tesis.

Resumen

El estudio consistió en generar el mapa del coeficiente de escorrentía "C" en el área urbana de las ciudades de Abancay y Tamburco (Apurímac), debido a que el crecimiento poblacional altera el uso del suelo, modificando la respuesta hidrológica e incrementando los caudales pluviales que colapsan los sistemas de drenaje y afectan las viviendas. El objetivo fue cartografiar espacialmente este parámetro a escala de subcuenca urbana para reducir la incertidumbre en la estimación de caudales máximos. Metodológicamente, se procesaron imágenes satelitales SPOT 5 mediante teledetección y Sistemas de Información Geográfica (SIG). Para el mapa de pendientes, se emplearon datos topográficos complementados con Google Earth, generando un Modelo Digital de Elevación (DEM) con resolución de 1x1 m para clasificar rangos de 0-2%, 2-7% y mayores a 7%. Al cruzar las pendientes con las tablas teóricas de Aparicio (1999), se validó la integración digital para espacializar el coeficiente "C". Como resultado, se identificaron 10 tipos de uso de suelo, determinando que en el área de estudio predominan las áreas verdes y suelos desnudos con un 57.03%, seguidos por un 23.97% de áreas pavimentadas o asfaltadas (vías), y un 18.99% de coberturas y techos de concreto. Se concluye que la combinación de teledetección y herramientas SIG permite validar con precisión la distribución del coeficiente de escorrentía en entornos urbanos andinos de topografía accidentada, sirviendo como base científica para la planificación y el diseño de infraestructura hidráulica.

Palabras clave: Coeficiente de escorrentía, teledetección, uso del suelo, mapa de pendientes, Sistemas de Información Geográfica***.***

Abstract

The study consisted of generating the runoff coefficient "C" map for the urban areas of Abancay and Tamburco (Apurimac), as population growth alters land use, modifying the hydrological response and increasing stormwater flows that collapse drainage systems and affect local housing. The objective was to spatially map this parameter at an urban sub-basin scale to reduce uncertainty in peak flow estimation. Methodologically, SPOT 5 satellite imagery was processed using remote sensing and Geographic Information Systems (GIS). For the slope map, topographical data complemented with Google Earth was utilized to generate a Digital Elevation Model (DEM) with a 1×1 m resolution, classifying slopes into ranges of 0–2%, 2–7%, and greater than 7%. By intersecting these slopes with Aparicio's (1999) theoretical tables, the digital integration was validated to spatialize the "C" coefficient. As a result, 10 types of land use were identified, determining that green areas and bare soils predominate in the study area with 57.03%, followed by 23.97% of paved or asphalted areas (roads), and 18.99% of concrete roofs and coverings. It is concluded that combining remote sensing and GIS tools allows for the accurate validation of the runoff coefficient distribution in Andean urban environments with rugged topography, serving as a scientific baseline for urban planning and hydraulic infrastructure design.

Keywords: Runoff coefficient, remote sensing, land use, slope map, Geographic Information Systems.

Índice general

Portada……..i
Acta de sustentación ii
Reporte de similitud.....iii
Metadatos Complementarios..... iv
Dedicatoria. v
Agradecimientos..... vi
Resumen…….....vii
Abstract……..…..viii
Índice general..... ix
Índice de Tablas xii
Índice de Figuras.....xiii
Índice de Anexos xv
I. Introducción..... 16
II. Planteamiento del problema..... 17
2.1 Descripción y formulación del problema 17
2.2 Formulación del problema de investigación..... 18
2.2.1 Problema general..... 18
2.2.2 Problemas Específicos..... 18
2.3 Objetivos 18
2.3.1 Objetivo General 18
2.3.2 Objetivos Específicos..... 18
2.4 Justificación e importancia 19
2.4.1 Justificación 19
2.4.2 Importancia 20
2.5 Hipótesis 20
2.5.1 Hipótesis General..... 20

2.5.2 Hipótesis Específicas 20
2.6 Variables 21
2.7 Cuadro de Operación de variable 22
III. Marco Teórico 23
3.1 Antecedentes 23
3.1.1 A nivel internacional 23
3.1.2 A nivel nacional 25
3.1.3 A nivel regional y local 27
3.2 Bases teóricas 29
3.2.1 Coeficiente de escorrentía 29
3.3 Definición de términos 31
3.3.1 Clasificación supervisada y no supervisada 31
3.3.2 Mapa de pendientes 31
3.3.3 Curvas de nivel 32
3.3.4 Modelo de Elevación Digital 32
3.3.5 Resolución de los píxeles 32
3.3.6 Imagen SPOT 5 33
3.3.7 Reclasificación de pendientes 33
3.3.8 ArcGIS 33
3.3.9 Tipo de suelos 33
3.3.10 Infiltración 34
3.3.11 Relieve 34
3.3.12 Precipitación 34
3.3.13 Escorrentía 34
IV. Metodología 35
4.1 Tipo y nivel de investigación 35
4.1.1 Tipo de investigación 35
4.1.2 Nivel de investigación 35
4.1.3 Enfoque de investigación 35

4.2 Diseño de investigación 36
4.3 Ámbito temporal 36
4.4 Ámbito espacial 36
4.5 Población 37
4.6 Muestra 37
4.7 Muestreo 38
4.8 Técnicas e Instrumentos 38
4.8.1 Técnicas 38
4.8.2 Método 38
4.8.3 Instrumentos 38
4.9 Procedimientos 39
4.10 Análisis de datos 41
4.11 Consideraciones éticas 41
V. Resultados y discusión 42
5.1 Resultados 42
5.1.1 Obtención del mapa de pendientes 42
5.1.2 Obtención del mapa de uso del suelo 46
5.1.3 Análisis de la imagen SPOT 5 48
5.1.4 Delimitación del área de estudio 48
5.1.5 Clasificación Supervisada 55
5.1.6 Obtención del mapa del coeficiente de escorrentía C 69
5.2 Discusión 77
5.2.1 Discusión crítica de resultados 77
5.2.2 Prueba de hipótesis 79
VI. Conclusiones 80
VII. Recomendaciones 81
VIII. Referencias 82

Índice de Tablas

Tabla 1 Operacionalización de las variables 22

Tabla 2 Rango de pendientes consideradas con las que se realizó la reclasificación..... 45

Tabla 3 Coeficiente de escorrentía para diferentes usos de suelo 47

Tabla 4 Diferentes tipos de uso de suelo para el cálculo de la firma espectral. 59

Tabla 5 Resultados del cálculo de la firma espectral de los diferentes tipos de uso de suelo. 64

Tabla 6 Se presentan las áreas obtenidas en el mapa de uso de suelo para cada tipo de suelo 68

Tabla 7 Coeficientes de escorrentía C para las pendientes y usos del suelo según Villón..... 69

Tabla 8 Asignación de valores numéricos en el mapa de pendientes 70

Tabla 9 Asignación de valores numéricos en los pixeles de mapa de uso de suelo 71

Tabla 10 Resultado de la matriz de valores asignados a los pixeles del mapa de uso de suelo. 73

Tabla 11 Reasignación de los valores en los pixeles calculados en la tabla 10 con la tabla 7..... 74

Tabla 12 Áreas de los coeficientes C en el ámbito del estudio..... 76

Índice de Figuras

Figura 1 Vista fotográfica de la zona de estudio 37

Figura 2 Procedimiento metodológico 39

Figura 3 Imagen del ámbito de estudio de la ciudad de Abancay. 42

Figura 4 Curvas de nivel obtenidos para el ámbito de la ciudad de Abancay cada 5m 43

Figura 5 Modelo de Elevación Digital para las ciudades de Abancay y Tamburco. 43

Figura 6 Propiedades y valores de la resolución de 1x1m del DEM 44

Figura 8 Mapa de pendientes reclasificadas para las ciudades de Abancay y Tamburco. 45

Figura 9 Imagen satelital SPOT 5 de la zona de estudio 48

Figura 10 Delimitación de los límites de las ciudades de Abancay y Tamburco en el programa ArcGis. 49

Figura 11 Imagen satelital recortada de los límites de las ciudades de Abancay y Tamburco 49

Figura 12 Visualización de la Imagen satelital SPOT 5 50

Figura 13 Área de análisis en la Imagen satelital SPOT 5 50

Figura 14 Visualización de las 07 bandas de las imágenes SPOT 5 51

Figura 16 Vista de la zona de estudio en falso color de la vegetación 52

Figura 17 Vista de la zona de estudio en falso color urbano 52

Figura 18 Vista de la zona de estudio las zonas agrícolas 53

Figura 19 Vista de la zona de estudio de zonas agrícolas 53

Figura 20 Clasificación no supervisada para la ciudad de Abancay 54

Figura 21 Resolución de la imagen satelital SPOT 5 de 2m de resolución .. 55

Figura 22 Características de la imagen satelital de 2m 55

Figura 23 Obtención de la firma espectral del suelo con asfalto 56

Figura 24 Obtención de la firma espectral del suelo con asfalto 56

Figura 25 Obtención de la firma espectral del suelo con asfalto 57

Figura 26 Muestreo de puntos para suelo con asfalto..... 57

Figura 27 Muestreo de puntos para suelo con asfalto..... 58

Figura 28 Total, de puntos de muestreados para el tipo de uso de suelo. ... 58

Figura 29 Localización en el ArcGIS de la opción para crear la firma espectral 59

Figura 30 Localización en el ArcGIS de la opción para la clasificación supervisada. 65

Figura 31 Imagen de resultados del procesamiento de la clasificación supervisada. 66

Figura 32 Imagen ampliada de resultados de clasificación supervisada. 66

Figura 33 Mapa final de uso de suelos obtenida..... 67

Figura 34 Valores asignados al mapa de pendientes con los valores asignados. 70

Figura 35 Valores asignados al mapa de usos de suelos con valores numéricos de la tabla 9 71

Figura 36 Función Ráster Calculator de Arc GIs..... 72

Figura 37 Valores calculados producto de la multiplicación de las matrices 72

Figura 38 Valores calculados producto de la multiplicación de las matrices 74

Figura 39 Imagen de las tablas obtenidas de los coeficientes C..... 75

Figura 40 Mapa de los coeficientes c para las ciudades de Abancay y Tamburco 76

I. Introducción

El análisis de la escorrentía superficial para diseñar y dimensionar infraestructuras de drenaje urbano es fundamental. El coeficiente de escorrentía (“C”) cuantifica la proporción de precipitación que se convierte en flujo superficial frente a la que se infiltra o evapora, y varía según el uso del suelo, la pendiente y la capacidad de infiltración del terreno (USDA Natural Resources Conservation Service, 2004). Su cartografía permite identificar áreas críticas para la gestión de aguas provenientes de las lluvias y mitigar cualquier tipo de inundación urbana.

La variabilidad espacial del coeficiente “C” se relaciona con las características del suelo y la cobertura terrestre. Superficies impermeables como pavimentos y edificaciones presentan valores altos de “C”, mientras que suelos no saturados y áreas verdes muestran valores bajos. Estudios recientes demuestran que la integración de modelos digitales de elevación (MDE) y cartografía de usos del suelo en Sistemas de Información Geográfica (SIG) facilita el cálculo distribuido del coeficiente, mejorando la precisión del mapeo (QGIS Development Team, 2021).

Las plataformas SIG, en particular QGIS, ofrecen herramientas específicas (análisis de cuencas, reclasificación de capas, modelador gráfico) para procesar datos de pendiente, tipo de suelo y cobertura terrestre, y así asignar valores de “C” a cada celda de la malla de análisis (QGIS Development Team, 2021). La automatización de estos procesos reduce tiempos de cálculo y minimiza errores de interpretación manual.

La provincia de Abancay y el distrito de Tamburco, en la región Apurímac (Perú), presentan una topografía accidentada y una heterogeneidad de usos del suelo, desde áreas agrícolas hasta núcleos urbanos compactos, que influyen significativamente en la generación de escorrentía superficial (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú. SENAMHI, 2021). La disponibilidad de datos pluviométricos, mapas de suelos (INGEMMET, 2019) y cobertura terrestre (Ministerio del Ambiente. MINAM, 2020) permite desarrollar un mapeo detallado del coeficiente “C” para ambas ciudades.

II. Planteamiento del problema

2.1 Descripción y formulación del problema

La falta de precisión en la estimación de caudales de diseño es una preocupación creciente a nivel global, ya que el cambio climático y la rápida urbanización alteran drásticamente los ciclos hidrológicos. En diversos países, la infraestructura hidráulica enfrenta fallas estructurales y operativas debido a la variabilidad e incertidumbre al determinar parámetros clave como el coeficiente de escorrentía ("C") o el número de curva (NC). Aunque hoy en día se cuenta con herramientas avanzadas de teledetección e información geoespacial para mapear el uso del suelo con alta precisión, en muchas partes del mundo aún persiste una brecha importante en la estandarización e integración de estas tecnologías informáticas para la planificación urbana sostenible.

En el contexto peruano, esta problemática se refleja en la escasez de información hidrológica actualizada y ajustada a la realidad territorial de cada región. La determinación del caudal máximo para la construcción de obras civiles —como pavimentaciones, sistemas de alcantarillado y redes de drenaje urbano— se realiza frecuentemente con datos genéricos o desactualizados. Esta carencia de estudios hidrológicos precisos lleva a que muchos proyectos de infraestructura a nivel nacional resulten subdimensionados o sobredimensionados, desencadenando pérdidas económicas considerables, deficiencias en la funcionalidad de las obras y una vulnerabilidad constante en la población ante eventos pluviométricos intensos.

A nivel local, las ciudades de Abancay y Tamburco en la región de Apurímac sufren directamente las consecuencias de no contar con un mapa del coeficiente de escorrentía "C" representativo al año 2025. El vertiginoso incremento de la infraestructura urbana y la pérdida de cobertura natural han transformado la superficie del suelo, pero la falta de datos hidrológicos confiables impide calcular adecuadamente los caudales de diseño. Como resultado, la parte baja de estas ciudades experimenta

severos procesos erosivos, inundaciones recurrentes e incluso la degradación y desertificación del territorio, afectando de manera directa la calidad de vida, la seguridad y la economía de sus habitantes.

2.2 Formulación del problema de investigación

2.2.1 Problema general

- ¿En qué medida se puede generar el mapa del coeficiente de escorrentía a partir de las características del suelo mediante herramientas informáticas en la ciudad de Abancay y Tamburco- 2025?

2.2.2 Problemas Específicos

- ¿En qué medida se podrá generar el mapa de pendientes del suelo mediante herramientas informáticas y analizar su influencia con el valor del coeficiente de escorrentía en la ciudad de Abancay y Tamburco- 2025?
- ¿En qué medida se podrá generar el mapa del uso del suelo mediante herramientas informáticas y su influencia con el valor del coeficiente de escorrentía en la ciudad de Abancay y Tamburco- 2025?

2.3 Objetivos

2.3.1 Objetivo General

- Generar el mapa del coeficiente de escorrentía a partir de las características del suelo mediante herramientas informáticas en la ciudad de Abancay y Tamburco.

2.3.2 Objetivos Específicos

- Recopilar información para generar el mapa de pendientes del suelo mediante herramientas informáticas y analizar su influencia con el valor del coeficiente de escorrentía en la ciudad de Abancay y Tamburco- 2025.
- Recopilar información para generar el mapa del uso del suelo mediante herramientas informáticas y analizar su influencia con el valor del coeficiente de escorrentía en la ciudad de Abancay y Tamburco- 2025.

2.4 Justificación e importancia

2.4.1 Justificación

Justificación Práctica. La elaboración de un mapa detallado del coeficiente de escorrentía “C” para Abancay y Tamburco permite optimizar el diseño de obras de drenaje pluvial y sistemas de contención. Al disponer de valores de escorrentía espacialmente distribuidos, los ingenieros civiles pueden dimensionar conductos, colectores y sumideros con mayor precisión, evitando sobredimensionar estructuras o subestimar caudales de avenida. Esto reduce costos constructivos y de mantenimiento, a la vez que garantiza un funcionamiento más eficiente de la infraestructura hidráulica urbana.

Justificación Social. Las inundaciones y acumulaciones de agua en zonas urbanas representan un riesgo directo para la población. Un mapeo riguroso del coeficiente “C” contribuye a identificar las áreas más vulnerables a escorrentías intensas y, por ende, a planificar acciones de mitigación (como zonas de retención o áreas verdes de infiltración). De este modo, se protege a los habitantes de posibles daños materiales y se mejora la calidad de vida mediante un entorno urbano más resiliente frente a eventos pluviales extremos.

Justificación Teórica. Desde el punto de vista académico, existe una brecha en los estudios hidrológicos locales que vinculen directamente las características del suelo y uso del territorio con la distribución espacial del coeficiente de escorrentía. Este trabajo aporta un enfoque integrado que relaciona mapas de pendientes, tipologías de suelo, cobertura del suelo e infiltración con valores de “C”, enriqueciendo la literatura con un caso aplicado en zonas andinas de montaña, donde la topografía y la heterogeneidad del uso del suelo plantean desafíos singulares.

Justificación Metodológica. La investigación propone un procedimiento sistemático y replicable que emplea herramientas SIG de código abierto (por ejemplo, QGIS) para procesar datos de elevación, cartas de suelos y clasificación de cobertura terrestre. Esta metodología agiliza la generación de mapas temáticos y la asignación de coeficientes

de escorrentía a cada unidad espacial. Al validar y documentar paso a paso este flujo de trabajo, se facilita su reutilización en otras cuencas y ciudades con características similares.

2.4.2 Importancia

El desarrollo de este mapa del coeficiente de escorrentía “C” reviste gran relevancia tanto para la planificación urbana como para la gestión del riesgo hídrico en Abancay y Tamburco. Proporciona a autoridades municipales y consultores una herramienta técnica de alto valor en el desarrollo de proyectos de drenaje, vialidad y espacios públicos. Asimismo, sienta las bases para estudios posteriores de modelación hidrológica, al ofrecer datos robustos que mejoran la confiabilidad de los modelos de simulación de avenidas y diseñan intervenciones más acertadas frente al cambio climático y el crecimiento urbano.

2.5 Hipótesis

2.5.1 Hipótesis General

- Las herramientas informáticas nos permiten generar el mapa del coeficiente de escorrentía a partir de las características del suelo en la ciudad de Abancay - 2025.

2.5.2 Hipótesis Específicas

- Las herramientas informáticas nos permiten generar el mapa de pendientes del suelo y analizar su influencia con el valor del coeficiente de escorrentía en la ciudad de Abancay – 2025.
- Las herramientas informáticas nos permiten determinar el mapa del uso del suelo y analizar la influencia del valor del coeficiente de escorrentía en la ciudad de Abancay – 2025.

2.6 Variables

Variables Independientes:

- Pendiente del suelo.
- Uso del suelo.

Variable Dependiente:

- Coeficiente de escorrentía C.

2.7 Cuadro de Operación de variable

Tabla 1

Operacionalización de las variables

Variable	Definición Conceptual	Definición Operacional	Dimensiones	Indicadores	Instrumento	Escala de medición
Variables Independientes:						
Pendiente del suelo.	La pendiente se describe como el declive del terreno y la inclinación, respecto a la horizontal, de una vertiente (Rodríguez Roa, s.f.).	- Cálculo de la pendiente mediante el cociente entre la diferencia de elevación y la distancia horizontal entre dos puntos del terreno.	Longitud de descenso/Longitud de avance.	Relación.	Imágenes Satelitales de Modelos de elevación digital	Porcentaje
Uso del suelo.	El uso del suelo comprende las acciones, actividades e intervenciones que realizan las personas sobre una superficie determinada para producirla, modificarla o mantenerla, incluyendo su transformación en terrenos agrícolas o urbanos (FAO/UNEP, 1999).	- Identificación y clasificación de coberturas (agrícola, pastizal, urbano) a partir de un análisis supervisado de imágenes SPOT en SIG.	Actividades de las intervenciones que se realiza sobre un determinado tipo de superficie de suelo.	Categoría.	Imágenes Satelitales SPOT 6.	Categórico
Variable Dependiente:						
Coeficiente de escorrentía.	Coeficiente de escorrentía (C) expresa la relación (proporción o porcentaje) entre la magnitud de escorrentía superficial (expresada en mm de lámina de agua) y la magnitud de lluvia (también en mm) correspondiente a un evento o periodo lluvioso en una cuenca o área de captación determinada (Food and Agriculture Organization of the United Nations [FAO], 2004).	- Estimación de C como la relación entre el volumen de escorrentía superficial calculado por modelo pluviométrico y el total de lluvia.	coeficiente de escorrentía	Relación.	Tabla de valores de la escorrentía para zonas urbanas y periurbanas (paricio, 1999).	Adim.

III. Marco Teórico

3.1 Antecedentes

3.1.1 A nivel internacional

En la esfera internacional, Carrión y Guajala (2024) desarrollaron la investigación titulada Diseño hidrológico para el embalse “Tres Piedras”, ubicado en la provincia del Azuay, presentada en la Universidad del Azuay. El objetivo principal de su estudio fue evaluar la dinámica de la escorrentía superficial mediante el análisis integrado de las pendientes del relieve y el estado del uso actual del suelo. Para ello, emplearon una metodología de tipo aplicada con un enfoque cuantitativo, basada en el procesamiento de modelos de elevación digital y la clasificación cartográfica de la cobertura vegetal. Entre sus principales resultados, determinaron que la variabilidad espacial del suelo ejerce una influencia determinante en la respuesta hidrológica de la zona de estudio. Concluyeron que la estimación ponderada y la espacialización del coeficiente de escorrentía resultan indispensables para alcanzar un diseño hidráulico preciso y una planificación óptima de las estructuras de captación hídrica.

En esa misma línea, Intriago y Cevallos (2024) publicaron el estudio Implementación de estrategias de manejo sostenible en la microcuenca Visquije, Santa Ana: Uso de atenuadores de escorrentía en la revista Ciencia Latina. Su investigación se planteó como objetivo analizar de qué manera los cambios drásticos en el uso del suelo incrementan la magnitud y frecuencia de las inundaciones locales. Aplicaron una metodología descriptiva-explicativa soportada en herramientas informáticas y geoprocesamiento, la cual consistió en la zonificación espacial del coeficiente de escorrentía y el Número de Curva a partir de la clasificación hidrológica de los suelos y la densidad de vegetación. Sus resultados demostraron una relación directa entre la alteración de la cobertura natural y el incremento significativo de los caudales pico. Por ello, concluyeron que la categorización precisa de las coberturas mediante herramientas digitales permite predecir los flujos superficiales y sustentar la implementación de atenuadores de escorrentía.

Por su parte, el Instituto de Geología y Geofísica (2025) presentó el estudio Amenaza por inundación pluvial en una microcuenca urbana de Managua, Nicaragua, publicado dentro del compendio Gestión del riesgo de desastres en América Latina y el Caribe. El objetivo central del trabajo fue evaluar la amenaza pluvial en un entorno altamente antropizado. La metodología empleada tuvo un enfoque cuantitativo y espacial, integrando mapas de pendientes topográficas y unidades de uso del suelo mediante Sistemas de Información Geográfica (SIG) para correlacionar espacialmente el coeficiente de escorrentía a través del Método Racional. Los resultados evidenciaron que la progresiva impermeabilización del terreno incrementa de forma crítica los valores del coeficiente C y acelera los tiempos de respuesta de la cuenca. De este modo, concluyeron que la modelación geoespacial constituye un instrumento clave para entender las alteraciones del escurrimiento pluvial y prevenir riesgos en zonas urbanas.

En el contexto europeo, Pérez (2023) realizó la investigación titulada Efectos de los cambios del uso del suelo en la hidrología y la estimación del coeficiente de escorrentía en la cuenca del Tajo, desarrollada en la Universidad de Alcalá bajo la asesoría de Molina Navarro. El objetivo de la tesis fue cuantificar el impacto hidrológico derivado de las modificaciones en la cobertura del suelo a lo largo del tiempo. Su metodología consistió en un análisis multitemporal de coberturas vegetales y áreas urbanas utilizando datos satelitales y procesamiento cartográfico en entornos SIG. Los resultados principales mostraron fluctuaciones considerables en los volúmenes de escorrentía generados por el crecimiento de las áreas impermeables. Concluyó que el modelamiento espacializado del coeficiente de escorrentía permite identificar con alta precisión las subcuencas que han perdido su capacidad de infiltración, validando la importancia de cartografiar minuciosamente este parámetro hidrológico.

Finalmente, el Equipo de Proyecto de la Universidad Nacional de San Martín (2024) elaboró el informe Diseño de un sistema de drenaje sostenible para la gestión de agua pluvial en la cuenca Radio Antiguo, Ciudad Autónoma de Buenos Aires. El trabajo tuvo por objetivo estructurar un plan de gestión de aguas pluviales en una zona urbana de alta

densidad. Su enfoque metodológico fue de carácter aplicado e interpretativo-espacial, utilizando el software libre QGIS para elaborar mapas temáticos del relieve urbano, combinar pendientes longitudinales y clasificar la densidad de edificación. Como resultado, lograron calibrar espacialmente los coeficientes de escorrentía en microcuencas urbanas consolidadas. Concluyeron que la utilización de herramientas SIG de código abierto permite automatizar los cálculos hidráulicos y optimizar el dimensionamiento de las infraestructuras de drenaje pluvial.

3.1.2 A nivel nacional

En el ámbito nacional, Montoya Rojas (2020) presentó en la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco la tesis Análisis multitemporal del uso de suelo y cobertura vegetal mediante el uso de herramientas SIG aplicados a la cuenca de Chuyapi - Santa Ana - La Convención – Cusco. El objetivo general fue investigar el impacto hidrológico ocasionado por la alteración de la cobertura natural en la cuenca. La metodología adoptada combinó el procesamiento multitemporal de imágenes satelitales en entornos SIG con la modelación de variables topográficas como la pendiente. Los resultados indicaron que las pendientes pronunciadas combinadas con el cambio de uso del suelo aceleran severamente las descargas del flujo superficial. El autor concluyó que la estimación de coeficientes de escorrentía espacializados a partir de unidades de cobertura provee un sustento metodológico riguroso y transferible a las cuencas de la región andina.

Asimismo, Céspedes (2021) desarrolló la tesis Evaluación de la infraestructura de drenaje pluvial urbano mediante modelos hidrológicos distribuidos para la Universidad de Huánuco. Su investigación buscó analizar el comportamiento de las redes de drenaje en paisajes urbanos heterogéneos. Implementó una metodología cuantitativa e integradora que articuló Sistemas de Información Geográfica con ecuaciones empíricas del Método Racional. Sus resultados demostraron que el entrecruzamiento de la pendiente del terreno con la clasificación del uso del suelo genera valores de escorrentía continuos y georreferenciados. En consecuencia, concluyó que esta metodología distribuida

representa la herramienta más eficiente para diagnosticar infraestructuras de drenaje en ciudades que experimentan un crecimiento urbano desordenado.

En esa misma línea, Arellano y Jiménez (2023) sustentaron en la Universidad Nacional del Santa la tesis Diseño de drenaje vial y optimización de la gestión hídrica superficial. El trabajo tuvo como propósito evaluar la influencia conjunta de la pendiente topográfica y la rugosidad de la cobertura urbana en el volumen de agua pluvial no infiltrada. La metodología aplicada consistió en la tabulación y análisis espacial de coeficientes de escorrentía específicos derivados de mediciones de permeabilidad y densidad de urbanización. Los resultados permitieron identificar variaciones significativas en la escorrentía según el nivel de impermeabilización vial. Concluyeron que estimar parámetros hidrológicos ajustados al relieve y al uso de suelo real optimiza el dimensionamiento de las obras de drenaje vial, evitando sobrecostos y fallas operativas.

De forma complementaria, Sandoval (2021) presentó en la Universidad de Huánuco la investigación Modelamiento hidrológico superficial mediante Sistemas de Información Geográfica. El estudio persiguió como objetivo automatizar la generación de cartografía hidrológica para el cálculo de caudales. Empleó una metodología cuantitativa-aplicada basada en el procesamiento de modelos digitales de elevación (DEM) y matrices ráster intersecadas con capas del uso actual del suelo. Sus resultados mostraron que la automatización geoespacial agiliza la asignación de coeficientes de escorrentía y minimiza el margen de error humano en la digitalización. Concluyó que el uso de herramientas SIG constituye una alternativa metodológica altamente precisa para agilizar los estudios hidrológicos en pequeñas y medianas cuencas.

Por último, investigadores de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de San Martín (2023) publicaron el estudio Evaluación de los efectos del cambio de uso del suelo y la precipitación en la disponibilidad y oferta hídrica. La investigación tuvo por objetivo evaluar la respuesta superficial del territorio ante los procesos de impermeabilización del suelo. Utilizaron una metodología cuantitativa-experimental estructurada en entornos SIG, la cual procesó matrices distribuidas de coeficientes de

escurrimiento tanto constantes como incrementales. Los resultados determinaron que el reemplazo de la cobertura vegetal nativa altera sustancialmente el balance hídrico local, multiplicando los caudales pico. Concluyeron que es imprescindible cartografiar el uso del suelo para prevenir escenarios críticos de escorrentía superficial provocados por la expansión urbana.

3.1.3 A nivel regional y local

En el ámbito estrictamente local, Jara y Merma (2023), en su tesis de titulación Modelamiento hidrológico y cálculo de parámetros geomorfológicos en subcuencas del departamento de Apurímac para la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, ejecutaron un análisis físico enfocado en la región de Apurímac, incluyendo entornos geográficos andinos con características idénticas a Abancay y Tamburco. Los investigadores realizaron la delimitación de microcuencas y procesaron la variable de la pendiente topográfica regional. Su mayor aporte al estudio local fue el cálculo cartográfico directo del coeficiente de escorrentía superficial, con el fin de sectorizar las respuestas hidrológicas frente a los episodios de precipitaciones intensas que caracterizan a la sierra sur peruana.

Ccarhuas y Huisa (2019). Estudio desarrollado en el área urbana de Tamburco y Abancay, Tesis en la Universidad Tecnológica de los Andes. Este análisis busca desentrañar el enigma del drenaje de aguas pluviales en el Distrito de Tamburco. En este estudio se emplea una técnica cuantitativa, con un propósito descriptivo y una metodología no experimental y transversal. De acuerdo con los estudios físico-mecánicos llevados a cabo en el laboratorio, se descubre que la mayoría de las calicatas según AASHTO son A-2-4 (0) grava, arena limosa y arcillosa; en cambio, según SUCS, son SM-SC y GP-GM, arena limo arcillosa y grava mal calibrada. A través de una variedad de programas informáticos, se orquestaron las cunetas en los colectores, adaptándose al flujo y la extensión del camino. Para alcanzar el diseño final, se tomó en cuenta el borde libre, que se adapta al flujo y se adapta a las recomendaciones. Las cunetas fueron concebidas en forma de rectángulo, triángulo y triángulo según su estructura. En el cruce de la Av. El Arco

con el Psj, se establece tres puntos de evacuación. En la Avenida Inca Garcilaso de la Vega, el torrente se dispara a 1.134 metros por segundo, mientras que en la Avenida Mariano Melgar, en el kilómetro 0 + 566.40, el torrente se dispara a 1.113 metros por segundo; se han ideado obras de arte para proteger el cauce, creando disipadores de energía que repartan el agua lluvial hacia los ríos.

Flores y Tejada (2017) En Chuquibambilla, en el corazón de Grau y Apurímac, se ha puesto en marcha el sistema de drenaje urbano. Tesis en la Universidad Tecnológica de los Andes. Según el censo más reciente del INEI de Población y Vivienda de 2007, Chuquibambilla contaba con 2612 habitantes, un aumento que se ha multiplicado entre 1993 y 2007. En el año 2016, se calcula que la población alcanzará las 2941 almas. De acuerdo con el SENAMHI, entre diciembre y marzo, las lluvias se intensifican, alcanzando los 150 mm mensuales, mientras que, entre abril y noviembre, las lluvias suelen ser escasas. En las épocas de lluvia, Chuquibambilla se transforma en un santuario de inundaciones, agravada por la falta de infraestructuras para que el drenaje pluvial drene las aguas del municipio; Además, la comunidad carece de destrezas para lidiar con estas calamidades naturales. Desde esta perspectiva, esta investigación pretende implementar el sistema de drenaje de laguas provenientes de las lluvias en el área analizada, enfrentando así el reto de implementar este sistema.

Cortez y Condori (2015). Ineficiencia en la calidad de vida de los habitantes debido a la desafortunada administración de las aguas pluviales en los vecindarios de Patibamba Baja y Pueblo Joven Centenario de Apurímac. Universitario de los Andes: Trabajo Final de Grado. Se propone una opción factible: erigir un sistema de drenaje diseñado para evacuar las aguas pluviales, esquivando así posibles riesgos para la comunidad durante las lluvias, con un diseño técnico ajustado a la topografía y a las exigencias locales. A lo largo de diez años, la quebrada Ullpuhuaycco experimentó un torrente de 1.042 metros cúbicos por segundo. Esta quebrada, canalizada y pavimentada, puede acoger hasta 1,3 metros cúbicos por segundo.

3.2 Bases teóricas

3.2.1 Coeficiente de escorrentía

a) Definición.

Conforme al ciclo hidrológico, la escorrentía es el fragmento de la lluvia que cae en una región o cuenca hidrológica y se desliza por la tierra, llegando a una corriente para ser drenado hasta su destino final, o bien nutrir un lago, dependiendo de si se trata de cuencas abiertas o cerradas (Villon, 2011).

La escorrentía conforme al ciclo hidrológico, el escurrimiento es la fracción de la lluvia que cae en una región o cuenca hidrológica y se desliza por la tierra, llegando a una corriente para ser drenada.

El torrente que fluye en un río se nutre de cuatro fuentes distintas, cada una con rasgos singulares, como se detalla a continuación (Villon, 2011).

b) Fuentes del Escurrimiento.

El río se despliega sobre el suelo cuando la superficie alcanza un nivel de humedad cercano a la saturación. Más adelante, se desplegará una danza subterránea que recorrerá las laderas, la matriz del suelo, las grietas de las rocas o las fronteras entre materiales de diversas características (Villon, 2011).

En el primer escenario, el torrente se integrará a un tributario del entramado de drenaje cuenca. En el segundo escenario, una fracción del agua subterránea podrá navegar a mares más profundos, mientras que otra se quedará como un refugio temporal, y finalmente regresará a la superficie, integrándose en los volúmenes que guiarán los diversos ríos hacia áreas de menor altitud (Villon, 2011).

Los orígenes primordiales del escurrimiento en ríos pueden ser divididos en cuatro categorías: precipitación directa sobre el río; flujo subterráneo; flujo base; y escurrimiento directo.

Impacto directo en el río. Es un aporte modesto en comparación con las otras fuentes, debido principalmente a la diminuta extensión que frecuentemente ocupan los ríos y corrientes.

Flujo sub superficial. Las dimensiones vinculadas a este flujo fluctúan tanto en el tiempo como en el espacio. En tiempos de sequía, podrán drenar con una cadencia casi perpetua, creando torrentes eternos. En otras circunstancias, sólo aportarán cantidades suficientes para prolongar, tras las lluvias recientes, el gasto en un río, creando así las corrientes intermitentes.

Cuando el aporte es mínimo, el agua en la superficie es casi inexistente; sin embargo, si hay lluvias, deshielos, etc., el eventual escurrimiento será efímero.

Si una porción del río experimenta un nivel de humedad bajo, el flujo se verá alterado, pues una porción será llevada a las riberas o a través de la plantación.

Flujo base. Es la contribución de un entramado acuático superficial a un río específico. Si una porción de la cuenca se ve alterada por una construcción hidráulica, como una presa o un sistema de riego, el gasto base se ajustará a los volúmenes vinculados a la operación de tales obras.

Escurrimiento directo. Es el volumen vinculado a la precipitación, es decir, el torrente residual tras la definición de las tres fuentes iniciales.

c) Procesos del escurrimiento.

Breña (s.f.) menciona que, para desentrañar la esencia del escurrimiento, se toman en cuenta factores como la fuerza de la lluvia; la habilidad de infiltración de una superficie específica; el estado hidráulico del suelo o la roca; y las peculiaridades hidráulicas del terreno.

Comparar estas variables revela los mecanismos que pueden surgir en diversas circunstancias.

Cuando la cantidad de agua caída supera la capacidad de infiltración y el nivel de humedad en el suelo o roca supera su resistencia al agua. En este escenario, el flujo acuático sobre la tierra será mínimo, pues el suelo o roca será capaz de absorber la mayor parte del agua que cae como lluvia. El flujo subterráneo será escaso, pues el agua recolectada será empleada para incrementar la humedad inicial.

Cuando el torrente de agua supera la capacidad de infiltración y la humedad del suelo o roca supera o supera su capacidad de campo. Como el suelo o roca se encuentra en un estado cercano a la capacidad de campo, parte de la lluvia se transformará en escurrimiento sobre el suelo; no obstante, los volúmenes permanecerán diminutos. El torrente subterráneo será crucial.

Cuando la lluvia supera la capacidad de infiltración y la humedad del suelo o roca supera la capacidad de campo. El suelo o roca carece de una considerable cantidad de agua, por lo que el agua que caiga, aunque su capacidad de infiltración es limitada, se destinará a reabastecer al suelo, drenando apenas una fracción diminuta.

Cuando las lluvias superan la capacidad de infiltración y la humedad del suelo o roca supera o supera su capacidad de campo. En este contexto, al encontrarse el suelo o la roca en una situación cercana a la saturación, no permitirá una infiltración significativa, transformando la mayoría del agua en manantial. El torrente subterráneo jugará un papel crucial. Cuando la superficie de un terreno no permite una infiltración significativa, se produce el conocido flujo Hortoniano, donde la saturación en un suelo o roca se concentra en una fracción superficial, impidiendo que el frente de humedad se adentre más allá, facilitando así el escurrimiento sobre el suelo.

3.3 Definición de términos

3.3.1 Clasificación supervisada y no supervisada

El análisis estadístico multivariado permite desentrañar múltiples clases y atributos, clasificando cada clase según sus probabilidades. Este método resulta sumamente útil para diseñar automáticamente un mapa de uso del terreno o de la cobertura vegetal. (Esri, 2021)

3.3.2 Mapa de pendientes

Un mapa de pendientes es un ráster basado en un Modelo Digital de Elevación (DEM) que determina la inclinación de la Tierra para cada celda, expresada en grados o porcentajes; esta herramienta es esencial en estudios de erosión, diseño de drenajes y planificación de infraestructuras, ya que permite detectar áreas vulnerables a

deslizamientos (valores elevados), áreas de captación natural (valores bajos) y diseñar rutas accesibles con algoritmos que utilizan ventanas de análisis 3×3 o mayores para suavizar picos de elevación (Esri, 2021).

3.3.3 Curvas de nivel

Líneas rectas que conectan puntos con igual altitud en un DEM o superficie topográfica, dibujadas a intervalos constante de equidistancia vertical; su densidad y forma desvelan la estructura del terreno —curvas densas revelan pendientes pronunciadas, mientras que curvas espaciadas revelan áreas planas— y se obtienen interpolando valores de elevación en celdas vecinas para asegurar continuidad, siendo fundamentales en cartografía clásica, análisis de cuencas y diseño de obras transversales como carreteras y canales—, y se obtienen interpolando valores de elevación en celdas vecinas para asegurar continuidad, siendo esenciales en cartografía clásica, análisis de cuencas y diseño de obras lineales como carreteras y canales (ArcGIS Pro, 2021)

Referencia

3.3.4 Modelo de Elevación Digital

Un Modelo Digital de Elevación (DEM) es una representación ráster o en red irregular de la altitud del planeta, obtenida de fuentes como LIDAR, fotogrametría aérea o satelital; este modelo actúa como cimiento para crear mapas de pendientes, análisis hidrológicos (captación, escorrentía), visibilidad (viewshed) y simulaciones de flujo, empleando formatos como GeoTIFF o Esri GRID para integrarse en sistemas de información geográfica y software de análisis geoespacial (U.S. Geological Survey, 2021).

3.3.5 Resolución de los píxeles

La dimensión espacial de un ráster, o tamaño de celda, refleja la extensión de cada píxel en unidades de coordenadas geográficas o proyectadas, revelando el grado de detalle de la información. Resoluciones diminutas (como 1 m) capturan cambios topográficos y objetos diminutos, mientras que resoluciones amplias (como 30 m) posibilitan abarcar vastos territorios con menos información. Estos factores impactan directamente en la exactitud de análisis derivativos como mapas de pendientes, cálculos de volúmenes y

cobertura de suelos, y demandan un equilibro entre precisión y eficacia en el almacenamiento, exigiendo un equilibrio entre precisión y eficacia en la gestión de datos (Esri, 2021).

3.3.6 Imagen SPOT 5

SPOT 5, el satélite del programa SPOT, lanzado en 2002 y manejado por Airbus Defence and Space, ofrece imágenes en modo pancromático a 2,5 metros de resolución y multiespectral a 10 metros, abarcando áreas de 60 kilómetros cuadrados con revisión diaria. Estas características lo convierten en un tesoro invaluable para mapear el uso del suelo, vigilar la agricultura y detectar cambios ambientales, integrable en sistemas GIS para clasificaciones supervisadas y análisis multitemporales (Airbus, 2020).

3.3.7 Reclasificación de pendientes

La reclasificación de pendientes consiste en agrupar rangos continuos de valores de inclinación derivada de un DEM en categorías discretas según criterios definidos (por ejemplo, zonas planas, moderadas o empinadas), asignando a cada celda ráster un nuevo valor de clase que facilita el análisis temático y la toma de decisiones en planificación territorial y estudios de riesgo (Esri, 2021).

3.3.8 ArcGIS

ArcGIS es una plataforma integral de Sistemas de Información Geográfica (SIG) desarrollada por Esri, que ofrece herramientas para la creación, gestión, análisis y visualización de datos geoespaciales, integrando aplicaciones de escritorio (ArcGIS Pro), web (ArcGIS Online) y móviles, y soportando flujos de trabajo en cartografía, teledetección, análisis hidrológico y modelamiento espacial (Esri, 2021).

3.3.9 Tipo de suelos

La clasificación de tipos de suelos agrupa unidades con propiedades físicas, químicas y biológicas similares en categorías geo-referenciables, facilitando la interpretación de suelos en estudios de agronomía, manejo de cuencas y diseño de obras civiles; estas categorías se basan en criterios como perfil de horizontes, textura, drenaje y

mineralogía, y pueden seguir sistemas internacionales como la WRB o nacionales adaptados (FAO, 2004).

3.3.10 Infiltración

La infiltración es el proceso mediante el cual el agua de lluvia o riego penetra desde la superficie hacia el interior del suelo, determinándose por la textura, estructura y contenido de humedad inicial del medio, y expresándose mediante la tasa máxima de infiltración (mm/h) que decrece conforme la humedad del perfil aumenta (U.S. Geological Survey USGS, 2019).

3.3.11 Relieve

El relieve es la distribución y variación de las formas de la superficie terrestre en un área determinada, entendida como el contraste entre elevaciones máximas y mínimas, e incluye elementos como montañas, valles, mesetas y llanuras, siendo un factor clave en geomorfología, hidráulica de canales y diseño de infraestructuras (Villon, 2011).

3.3.12 Precipitación

La precipitación es la deposición de agua desde la atmósfera hacia la superficie terrestre en forma líquida (lluvia, llovizna) o sólida (nieve, granizo), y constituye el principal aporte de agua al ciclo hidrológico, midiendo su intensidad y acumulado en mm a través de pluviómetros y redes de monitoreo (Villon, 2011).

3.3.13 Escorrentía

La escorrentía es el flujo de agua sobre la superficie terrestre generado cuando la precipitación excede la capacidad de infiltración del suelo, desplazándose hacia canales y cauces, e incluye tanto el escurrimiento superficial (overland flow) como el subsuperficial en suelos saturados, siendo determinante en el balance hídrico de cuencas (Villon, 2011).

IV. Metodología

4.1 Tipo y nivel de investigación

4.1.1 Tipo de investigación

El tipo de investigación se refiere al enfoque general y al propósito principal de un estudio científico, pudiendo clasificarse en básica (o pura), cuyo fin es generar conocimiento teórico, y aplicada, que busca resolver problemas concretos mediante la aplicación de teorías existentes (Hernadez et al, 2004)

En este estudio se adopta un enfoque aplicado, pues se pretende generar un producto cartográfico concreto (mapa del coeficiente de escorrentía) que contribuya a la gestión de la evacuación de aguas pluviales en las ciudades de Abancay y Tamburco. Se apoyará en teorías hidrológicas ya consolidadas para generar información práctica destinada a planificación urbana y manejo de zonas de drenaje.

4.1.2 Nivel de investigación

El nivel de investigación describe el grado de profundización y control de las variables en un estudio. Los niveles más comunes son exploratorios (para clarificar conceptos y formular hipótesis), descriptivo (para detallar características de un fenómeno) y correlacional/explicativo (para determinar relaciones de causa-efecto) (Gobierno de México, 2009).

La presente tesis es de nivel descriptivo, ya que describe espacialmente cómo varía el coeficiente de escorrentía en función del uso del suelo y, a la vez, analiza la diferencia entre categorías de uso del suelo (vial, agrícola, urbano, pastizal) y valores de “C” en las dos ciudades estudiadas.

4.1.3 Enfoque de investigación

El enfoque cuantitativo se basa en la recolección y análisis de datos numéricos, aplicando métodos estadísticos y matemáticos para medir variables con precisión y establecer relaciones cuantificables entre ellas; este método privilegia la objetividad, la replicabilidad y la posibilidad de generalizar resultados a partir de instrumentos estandarizados y procedimientos rigurosos (Silva Balaguera et al., 2023).

En la presente investigación, el enfoque es cuantitativo ya que se implementa el cálculo del coeficiente de escorrentía “C” mediante análisis estadístico de las láminas de precipitación vs. volumen de escorrentía en cada clase de uso de suelo. Los datos satelitales (SPOT 5) y pluviométricos se procesan en SIG para obtener valores numéricos de “C”, que luego se correlacionan estadísticamente con las categorías de uso del suelo.

4.2 Diseño de investigación

El diseño de investigación es la estructura lógica y planificada que guía la recolección y el análisis de datos para responder a las preguntas de investigación. Para la presente investigación el diseño es transversal (datos recolectados en un solo momento) y el longitudinal (observaciones en varios momentos), y pueden ser no experimentales cuando no se manipulan variables (Creswell, 2014).

Se emplea un diseño no experimental, dado que los datos (imágenes SPOT 5, DEM y mapas de uso del suelo) corresponden al año 2023 y no hay manipulación experimental de las variables. El análisis estadístico y espacial se realiza a partir de esta “fotografía” anual.

4.3 Ámbito temporal

El ámbito temporal define el período durante el cual se recopilan y analizan los datos, pudiendo ser puntual (un solo momento) o periodo (varias fechas), lo que influye en la validez interna y externa del estudio (Arias, 2012).

El estudio abarca el año 2023. La información satelital (SPOT 5) corresponde al año 2016 dado que no se cuenta con dicha información reciente, garantizando coherencia temporal en la modelación del coeficiente de escorrentía.

4.4 Ámbito espacial

El ámbito espacial describe la extensión geográfica del estudio, que puede ser local, regional o global, y determina la generalizabilidad de los resultados.

Se delimita a las zonas urbanas y periurbanas de las ciudades de Abancay y Tamburco (Apurímac). Se trabajará con la cuadrícula 28-q Zona UTM: Zona 18L (hemisferio sur) del Instituto Geográfico Nacional y se validará con imágenes de Google Earth.

4.5 Población

En la presente investigación no experimental, la población es el conjunto completo de elementos con características comunes de interés para el estudio, de los cuales se extrae la muestra (Hernández, et al., 2014).

La población está constituida por todas las unidades espaciales (píxeles) que cubren las zonas urbana y periurbana de Abancay y Tamburco, para las cuales se dispone de capas de uso de suelo, imágenes DEM e imágenes satelitales delimitados en las zonas indicadas.

Figura 1

Vista fotográfica de la zona de estudio



Nota. Vista de la Población de Abancay y Tamburco.

4.6 Muestra

La muestra es un subconjunto representativo de la población, seleccionada mediante muestreo probabilístico o no probabilístico, que permite realizar inferencias con menor costo y tiempo (Kothari, 2004), en este caso la muestra fue no probabilística.

4.7 Muestreo

Dado que el análisis espacial abarca toda la cobertura disponible (uso del suelo y DEM en SIG), la muestra coincide con la población (muestra censal), es decir, se procesan todos los píxeles de las imágenes satelitales ubicadas en los límites de las ciudades consideradas de Abancay y Tamburco.

4.8 Técnicas e Instrumentos

4.8.1 Técnicas

Las técnicas son los procedimientos concretos empleados para recolectar y procesar datos, como la teledetección, SIG, análisis estadístico y revisión documental (Creswell, 2014).

- Teledetección: procesamiento de imágenes SPOT 5 para clasificación de uso del suelo.
- SIG: integración de capas DEM, uso del suelo y lluvia en ArcGIS.
- Estadística espacial: cálculo de coeficiente “C” mediante relaciones de matrices a través del algebra de mapas en un sistema de información geográfica.

4.8.2 Método

En el presente trabajo de investigación se desarrolló según el procedimiento descrito en el item 4.9

4.8.3 Instrumentos

Los instrumentos son las herramientas específicas (software, cuestionarios, equipos) que implementan las técnicas; por ejemplo, ArcGIS, R Studio y Google Earth Engine para análisis de datos geoespaciales (Arias, 2012).

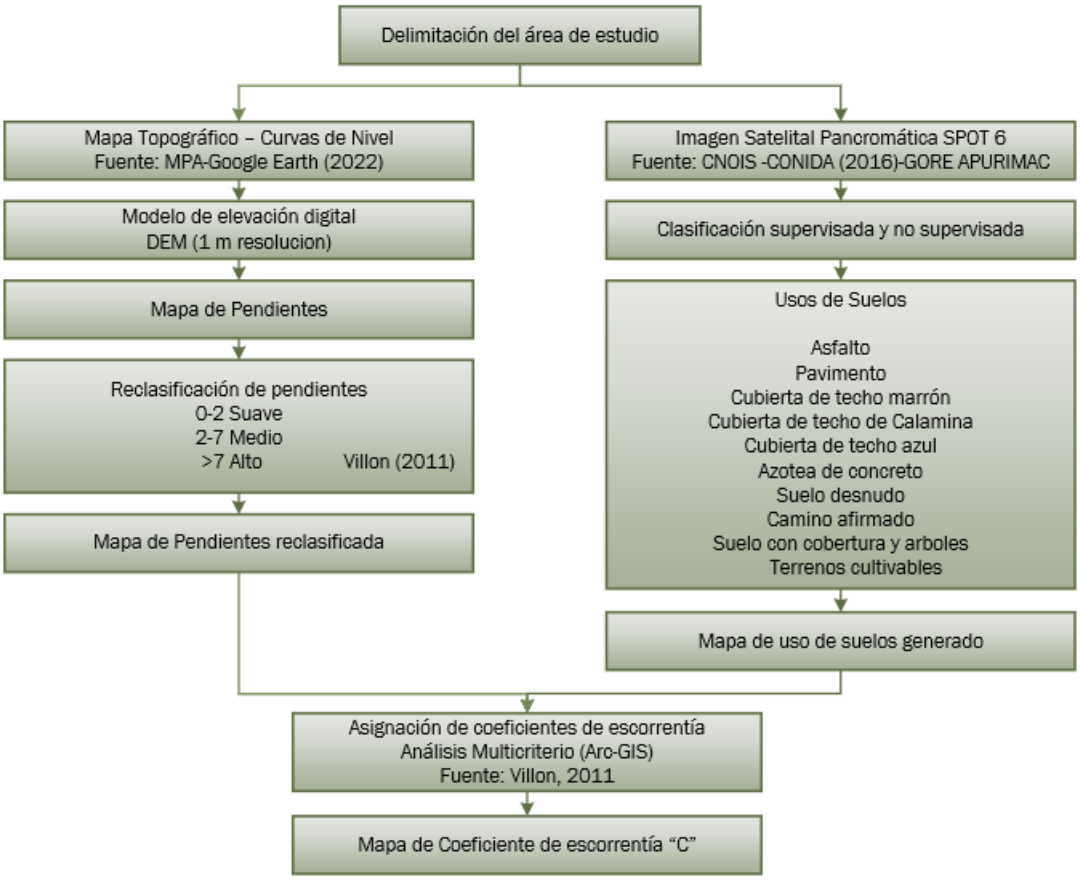
- Software SIG: ArcGIS 10.4 y QGIS para procesamiento ráster.
- Software de imágenes: ERDAS Imagine para clasificación supervisada.
- Análisis y gráficos: R Studio para estadística de correlación y validación.

4.9 Procedimientos

El procedimiento detalla la secuencia de pasos sistemáticos para ejecutar la investigación: desde la adquisición de datos, preprocesamiento, análisis hasta la validación de resultados (Hernández et al., 2014).

Figura 2

Procedimiento metodológico



Nota. En la figura se observa la distribución secuencial del procedimiento que se ejecutó la tesis.

El procedimiento metodológico estructurado para la determinación espacial del coeficiente de escorrentía (C) se desarrolla en cuatro fases consecutivas, articuladas mediante sistemas de información geográfica (SIG) y teledetección:

1. Delimitación y Fase Preparatoria

El punto de partida consiste en la delimitación precisa del área de estudio, estableciendo la unidad territorial de análisis. A partir de este límite, la investigación se bifurca en dos líneas de procesamiento de datos espaciales: el análisis topográfico y el análisis de la cobertura terrestre.

2. Procesamiento Topográfico y Análisis de Pendientes

Para caracterizar el relieve de la zona, se utiliza el Mapa Topográfico (Curvas de Nivel) proveniente de la Municipalidad Provincial de Abancay (MPA) y Google Earth (2022).

A partir de estas curvas, se genera un Modelo de Elevación Digital (DEM) con una alta resolución espacial de 1 metro.

Con el DEM estructurado, se procesa el Mapa de Pendientes, el cual es posteriormente categorizado mediante una reclasificación basada en los criterios de Villón (2011). Las pendientes se agrupan en tres niveles críticos para la dinámica hidráulica: Suave (0-2%), Medio (2-7%) y Alto ($> 7\%$), obteniendo así el Mapa de Pendientes Reclasificada.

3. Teledetección y Clasificación del Uso de Suelos

En paralelo, se evalúan las características de la superficie terrestre utilizando una Imagen Satelital Pancromática SPOT 5 (procedente de CNOIS-CONIDA 2016 y el GORE Apurímac).

Mediante técnicas de clasificación supervisada y no supervisada, se identifican y separan las distintas coberturas antrópicas y naturales de la zona (que incluyen desde superficies impermeables como asfalto, pavimentos y diversos tipos de techumbres, hasta zonas permeables como suelo desnudo, caminos afirmados, cobertura vegetal y terrenos de cultivo).

El resultado de este tratamiento digital es el Mapa de Uso de Suelos Generado.

4. Integración Multicriterio y Modelación de la Escorrentía

Finalmente, confluyen el mapa de pendientes reclasificadas y el mapa de uso de suelos. Mediante un Análisis Multicriterio en la plataforma ArcGIS, y aplicando nuevamente

los lineamientos teóricos de Villón (2011), se realiza la asignación ponderada de los coeficientes de escorrentía correspondientes a cada combinación de suelo y pendiente.

Este cruce de variables espaciales culmina con la obtención del producto final de la metodología: el Mapa de Coeficiente de Escorrentía (C), insumo fundamental para la modelación hidrológica y el diseño de infraestructura de drenaje en la zona.

4.10 Análisis de datos

El análisis de datos comprende técnicas estadísticas y espaciales para procesar, interpretar y visualizar información, usando métodos como análisis de correlación, regresión, y estadística descriptiva (Kothari, 2004).

Se utilizará estadística descriptiva (medias y desviaciones de la “firma espectral” según uso del suelo y análisis de correlación espacial (coeficiente de Pearson entre categorías de uso y valores “C”) en R Studio. Los mapas temáticos facilitarán la interpretación cartográfica.

4.11 Consideraciones éticas

Las consideraciones éticas en investigación cubren el respeto a la autoría, uso responsable de datos y transparencia en la metodología, asegurando citaciones adecuadas y acceso abierto a las fuentes (Instructivo en Investigación).

Se garantiza la citación rigurosa de todas las fuentes (datos satelitales y bibliografía), el uso de software licenciado o de código abierto, y la transparencia en el reporte de procedimientos para posibilitar la replicabilidad.

La ética en la investigación social y de campo exige un compromiso con la honestidad intelectual, el respeto a la autoría y la transparencia en la gestión de la información, de manera que se salvaguarde la confianza y la integridad de los datos utilizados (Israel & Hay, 2006).

La información ha sido obtenida y además empleada con su respectiva autorización. Asimismo, se reconoce las contribuciones ajenas y se exponen detalladamente todos los procedimientos para que puedan ser contrastados o verificados por los lectores del presente estudio.

V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 Resultados

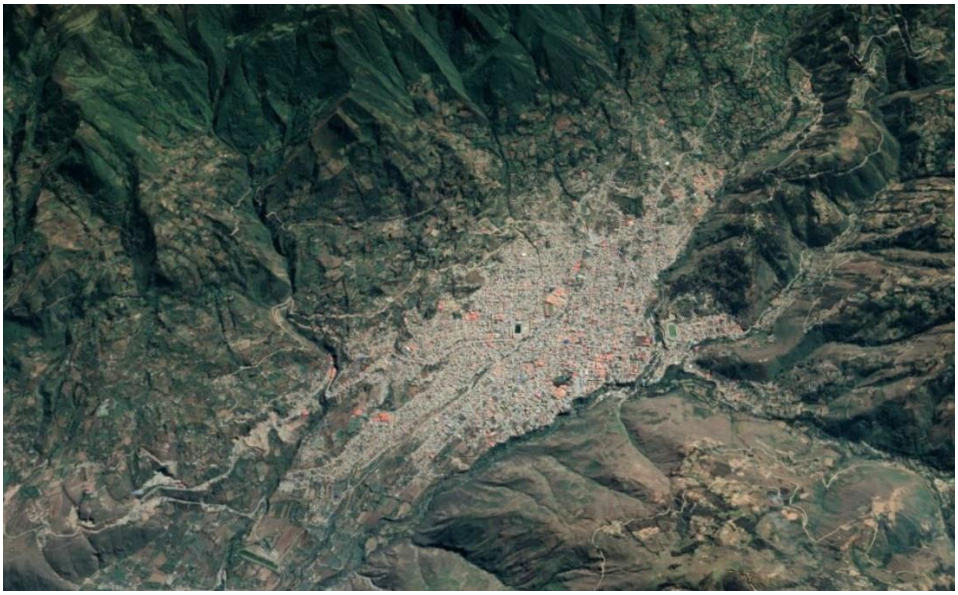
5.1.1 Obtención del mapa de pendientes

Ubicación de la zona de estudio

El área de análisis son las ciudades de Abancay y Tamburco ubicado en la cuenca media del rio Mariño. Esta zona presenta extensas zonas urbanas y áreas agrícolas, con diferente grado de uso.

Figura 3

Imagen del ámbito de estudio de la ciudad de Abancay.



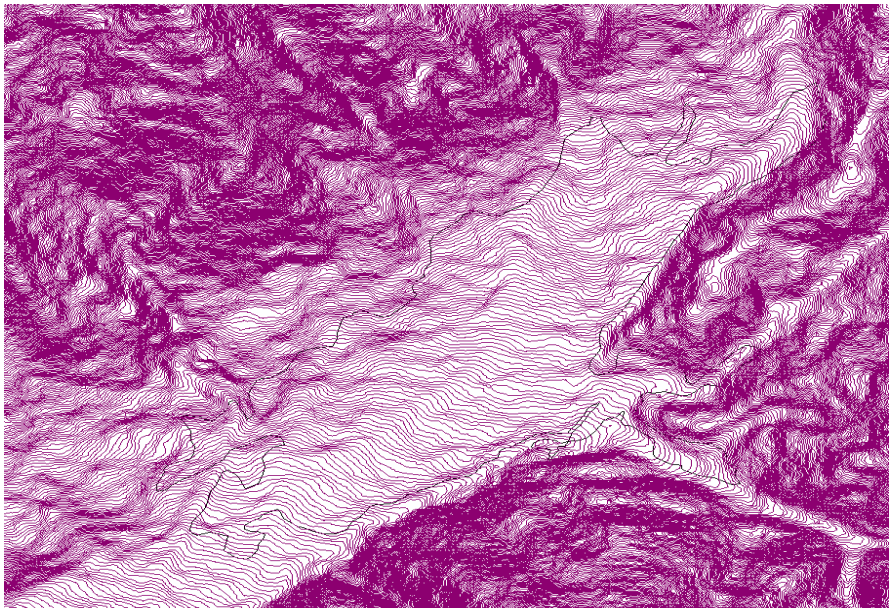
Nota. Se observa el área de estudio de la ciudad de Abancay Apurímac.

Curvas de nivel

Las curvas de nivel se generaron a partir de las imágenes satelitales de Google Earth y de datos topográficos de la ciudad de Abancay obtenido del proyecto Mejoramiento del servicio de Agua potable de Abancay (EMUSAP) a las que se tuvo que complementar con puntos georreferenciados de Google Earth y procesados en el programa ArcGIS 10.4 para los cuales se obtuvo las siguientes curvas cada 5m de desnivel, obtenidos en el programa Google Earth Pro y con el utilitario GPS visualizar.

Figura 4

Curvas de nivel obtenidos para el ámbito de la ciudad de Abancay cada 5m



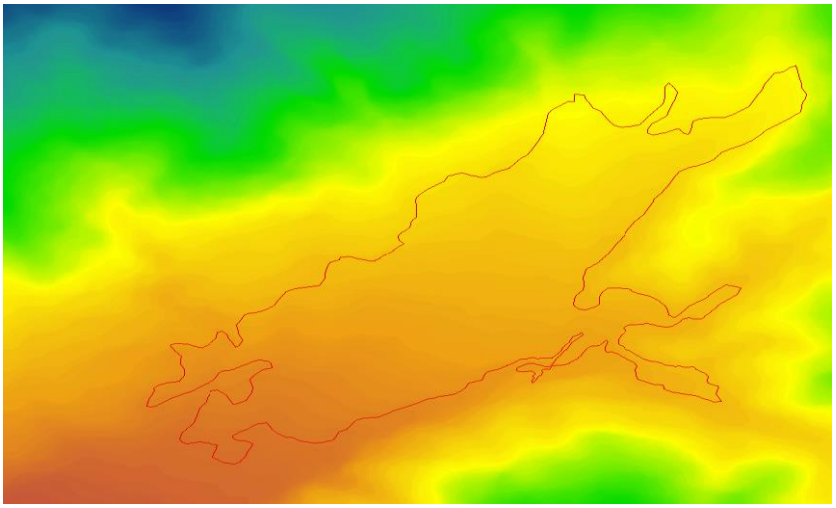
Nota. Curvas de nivel cada 5m obtenidos de Google Earth Pro.

Modelo de Elevación Digital DEM

Para la obtención del mapa de pendientes se realizó a partir del modelo de elevación digital a la vez también obtenido de las curvas de nivel con los que se obtuvo una imagen ráster de los límites de la ciudad de Abancay y Tamburco.

Figura 5

Modelo de Elevación Digital para las ciudades de Abancay y Tamburco.



Nota. Se observa el DEM obtenido a partir de las curvas de nivel de 1 m de resolución.

Figura 6

Propiedades y valores de la resolución de 1x1m del DEM

Property	Value
Raster Information	
Columns and Rows	8921, 8392
Number of Bands	1
Cell Size (X, Y)	1, 1
Uncompressed Size	285.59 MB
Format	GRID
Source Type	Generic
Pixel Type	floating point
Pixel Depth	32 Bit
NoData Value	-3.40282346639e+038

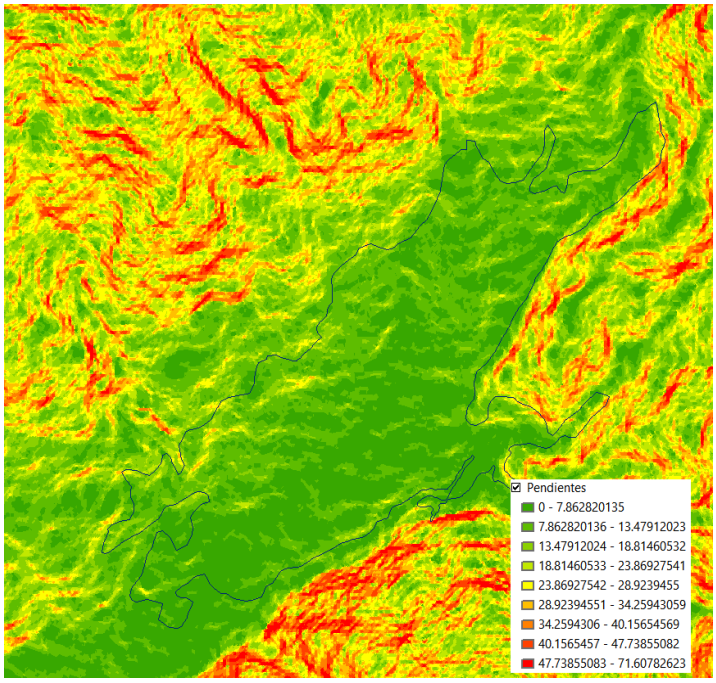
Nota. Información de la resolución de los pixeles es de 1m x 1m (Cell Size(x,y), el cual define algunas características del DEM obtenido en el programa de Arc GIS.

Cálculo del mapa de pendientes

Una vez obtenido el modelo de DEM para las ciudades de Abancay y Tamburco con lo que se obtuvo las pendientes del terreno los cuales fueron obtenidas del programa Arc GIS el cual se muestra a continuación.

Figura 7

Mapa de pendientes para las ciudades de Abancay y Tamburco generadas por defecto.



Nota. Se observa los colores de los pixeles a escala desde 0 – 71.607, donde el color verde tiene una elevación baja y el pixel color rojo la más alta. Fuente: Elaboración Propia.

Para poder utilizar en la determinación del mapa del coeficiente de escorrentía este rango de pendientes se reclasificó en tres rangos de acuerdo a la tabla de Chow et al (1998) Véase Tabla 2.

Tabla 2

Rango de pendientes consideradas con las que se realizó la reclasificación

Rango de pendientes (%)	Descripción
Pendiente (0-2%)	Suave
Pendiente (2-7%)	Medio
Pendiente (>7%)	Alto

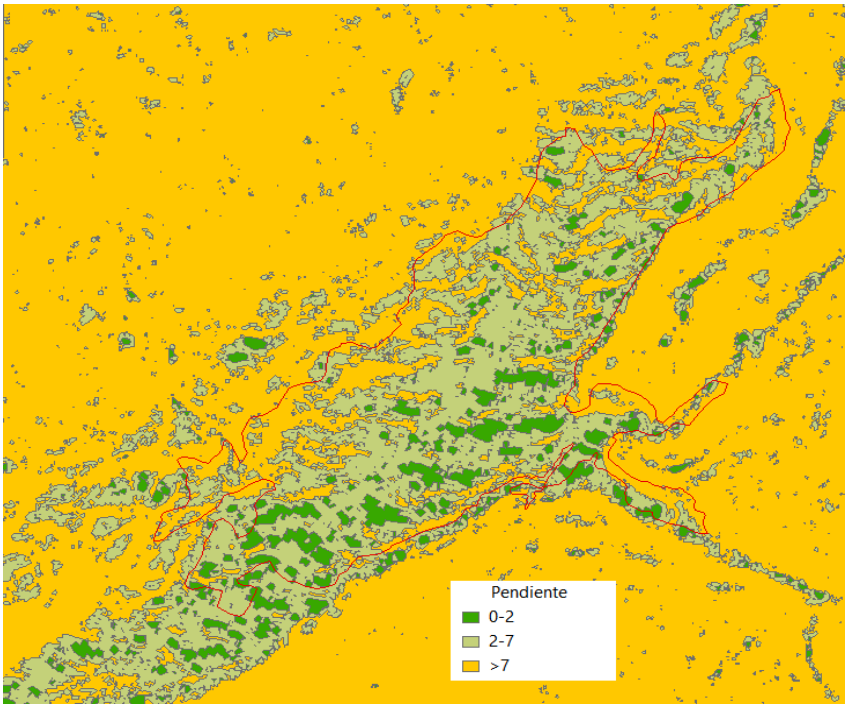
Nota. Se observa las pendientes de un rango de 0% hasta mayores a 7%, es decir de suave a alto. Fuente: Chow, V; Maidment, D y L. Mays. (1988)

Reclasificación del mapa de pendientes

Una vez obtenido el mapa de pendientes para las ciudades de Abancay y Tamburco con lo que se obtuvo las pendientes del terreno en porcentajes los cuales fueron obtenidas del programa Arc GIS el cual se muestra a continuación.

Figura 8

Mapa de pendientes reclasificadas para las ciudades de Abancay y Tamburco.



Nota. En la figura se observa los colores verdes a amarillo de 0 a 7 lo cual representan los pendientes en %. Fuente: Elaboración Propia

Los mismos que se determinaron en los rangos de pendientes en porcentaje recomendados por Chow, V; Maidment, D y L. Mays. (1988). con lo cual se determinó la primera variable del estudio realizado.

5.1.2 Obtención del mapa de uso del suelo

Con el fin de desarrollar una técnica que permita calcular de forma meticulosa los coeficientes de escorrentía de diversos usos del suelo, en este segundo escenario se empleó, dentro de las técnicas de teledetección, la clasificación supervisada de una imagen satelital para identificar diversas coberturas y usos de suelo en la región analizada y que puedan ser vinculados entre sí. Desde la premisa de que cada material tiene su propia "firma espectral", cada pixel de una imagen satelital puede ser vinculado a un uso específico del terreno. Con esta técnica, se logró dividir la imagen en 10 categorías de uso del terreno (ver tabla 3). Cada categoría se caracteriza por su propia identidad. Posteriormente, se asignaron coeficientes de escorrentía a cada tipo de suelo para identificar un C compuesto en cada tipo de suelo analizado a través de una clasificación supervisada. Con base en los hallazgos del índice de construcción, se optó por emplear la imagen del junio de 2016 capturada por el satélite SPOT 5, la cual resultó ser la más precisa. Para el análisis, se seleccionaron sólo seis bandas: tres del espectro visible (rojo, verde y azul) y tres del espectro no visible (una del infrarrojo cercano y dos del infrarrojo medio). Se llevó a cabo un análisis meticuloso de la imagen, estableciendo antes zonas de aprendizaje o áreas de interés (ROIs) para cada tipo de cobertura. A partir de estas áreas, se elaboraron las estadísticas para ubicar a cada pixel en una categoría, considerando su probabilidad de encajar en ella. En esta ocasión, se optó por el enfoque de la Máxima Verosimilitud, ya que se ha demostrado previamente que estas clasificaciones logran resultados más favorables (Riccardi et al., 2018). En el ámbito rural, cualquier tipo de cobertura, ya sea desnudo, cultivado o césped, resulta sencilla, aunque en las áreas urbanas se complica, ya que las edificaciones generalmente son menores que el píxel. Al determinar las áreas a inspeccionar, se obtiene una representación gráfica

como la que se observa en la Figura 07. En esta representación, los píxeles fueron pintados en blanco, representando superficies impermeables como el concreto, los techos y el asfalto, mientras que en marrón y diversos tonos verdes, los representando superficies permeables como el suelo desnudo, el césped, los cultivos y la arboleda. Mendez Zacarías y Zimmermann (2011), Mendez Zacarías y Zimmermann (2014) y Riccardi et al. (2018) confirmaron la metodología de clasificación supervisada. En última instancia, se puede vincular cada tipo de suelo descrito en la clasificación supervisada a un coeficiente de escorrentía adaptado a sus peculiaridades, con el fin de calcular los valores promedio de C de cada cuenca analizada. En la Tabla 3 se detallan las diversas capas de protección del terreno y el coeficiente C.

Uso del suelo y valores según pendiente

Los valores de C han sido establecidos por Chow et al (2018), con los cuales se han de asignar a los pixeles que cumplan dichas características de pendiente y de tipo de uso de suelo con los que establecieron por el Método de análisis multicriterio realizado en un sistema de información geográfica.

Tabla 3

Coeficiente de escorrentía para diferentes usos de suelo

Uso del suelo	Pendientes		
	0-2	2-7	>7
Asfalto	0.70	0.83	0.95
Pavimento	0.70	0.83	0.95
Cubierta de techo marron	0.75	0.85	0.95
Cubierta de techo de calamina	0.75	0.85	0.95
Cubierta de techo azul	0.75	0.85	0.95
Azotea de concreto	0.50	0.60	0.70
Suelo desnudo	0.10	0.30	0.50
Camino afirmado	0.10	0.30	0.50
Suelo con covertura y arboles	0.10	0.23	0.35
Terrenos cultivables	0.10	0.23	0.35

Nota. En la Tabla se observa los diferentes tipos de suelos y sus correspondientes coeficientes de escorrentía para los tres tipos de pendiente. Fuente: Chow et al (2018) , Villon (2010).

Respecto a la metodología desarrollada a partir de la clasificación supervisada, se determinaron valores medios de coeficientes de escorrentía para cada una de los diferentes usos del suelo a partir de la Tabla 3.

5.1.3 Análisis de la imagen SPOT 5

Para el presente estudio se tiene la imagen SPOT 5 imagen obtenida del Gobierno Regional de Apurímac a través de la unidad ejecutora Pro desarrollo:

Figura 9

Imagen satelital SPOT 5 de la zona de estudio



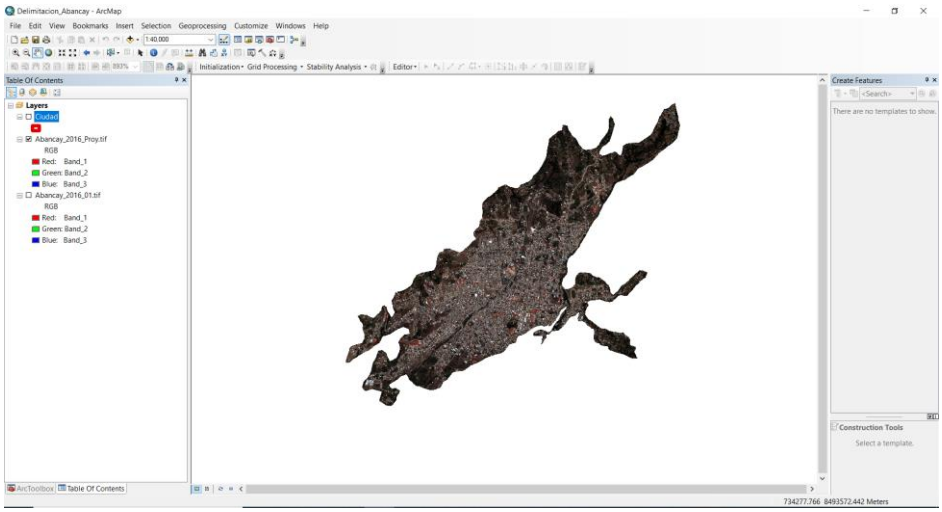
Nota. En la figura se observa imagen spot 5 tomada para la ciudad de Abancay y Tamburco. Fuente: Gobierno Regional de Apurímac (2016).

5.1.4 Delimitación del área de estudio

Para la delimitación del área de estudio se utilizó el programa Arc GIS donde considera las zonas urbanas y sus expansiones de la ciudad (urbano marginales).

Figura 10

Delimitación de los límites de las ciudades de Abancay y Tamburco en el programa ArcGis.



Nota. En la figura se observa el recorte para la ciudad de Abancay y Tamburco. Fuente: Gobierno Regional de Apurímac (2016)

Para poder establecer el análisis en la zona urbana de las dos ciudades se recortó la imagen satelital en base a los límites de dichas ciudades para que el análisis sea solamente en la zona urbana obteniéndose una imagen con en la figura 11.

Figura 11

Imagen satelital recortada de los límites de las ciudades de Abancay y Tamburco



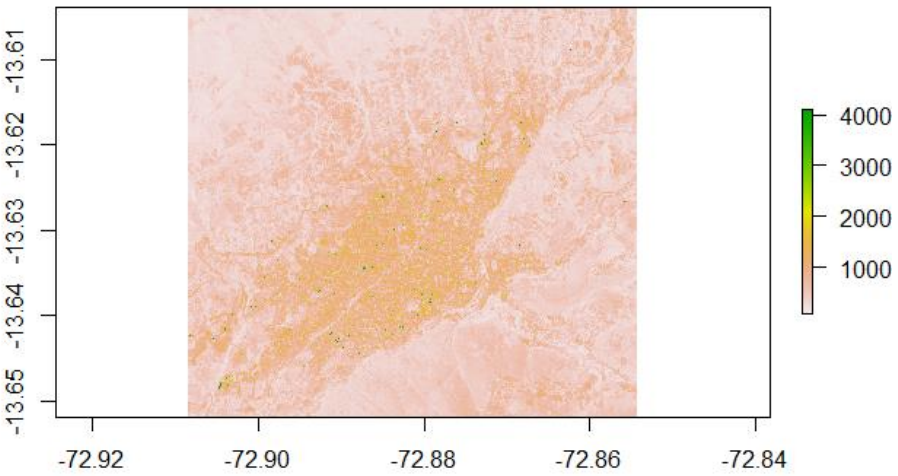
Nota. En la figura se observa el recorte final para la ciudad de Abancay y Tamburco. Fuente: (GIS).

5.1.4 Clasificación no supervisada

Para la determinación de los usos de suelo se realizó el análisis espacial de las imágenes satelitales de la ciudad de Abancay y Tamburco de manera automatizada en el programa R studio para observar el comportamiento de las características principales del suelo en el que podemos visualizar los elementos más representativos del uso de suelo.

Figura 12

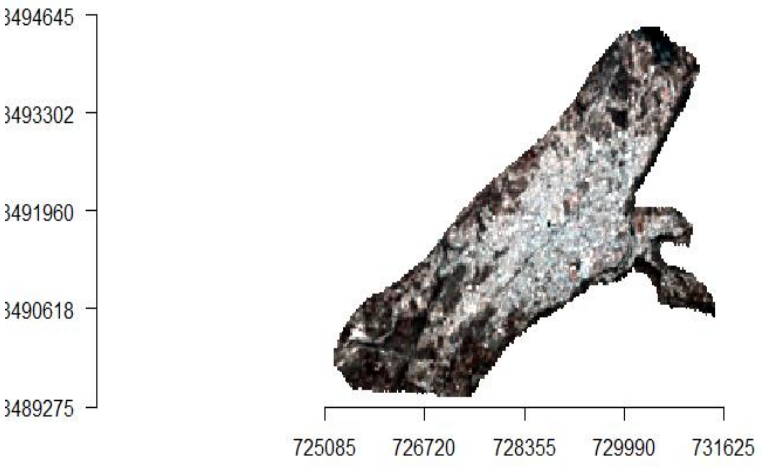
Visualización de la Imagen satelital SPOT 5



Nota. En la figura se observa las reflectancias de la ciudad de Abancay y Tamburco. Fuente: GIS.

Figura 13

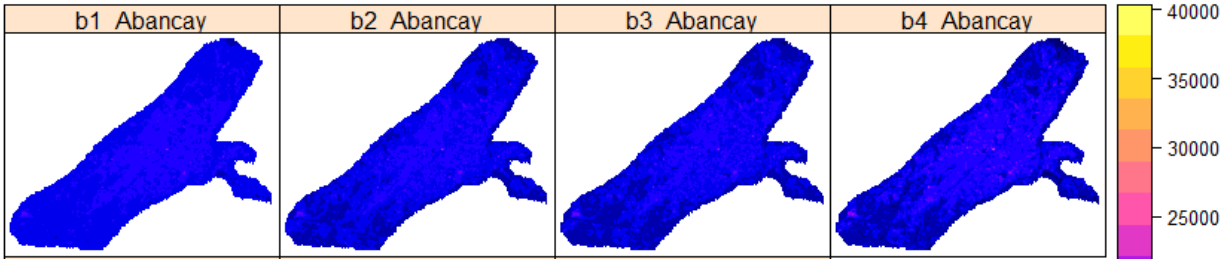
Área de análisis en la Imagen satelital SPOT 5



Nota. En la figura se observa las coordenadas de la imagen SPOT 5. Fuente: GIS.

Figura 14

Visualización de las 04 bandas de las imágenes SPOT 5

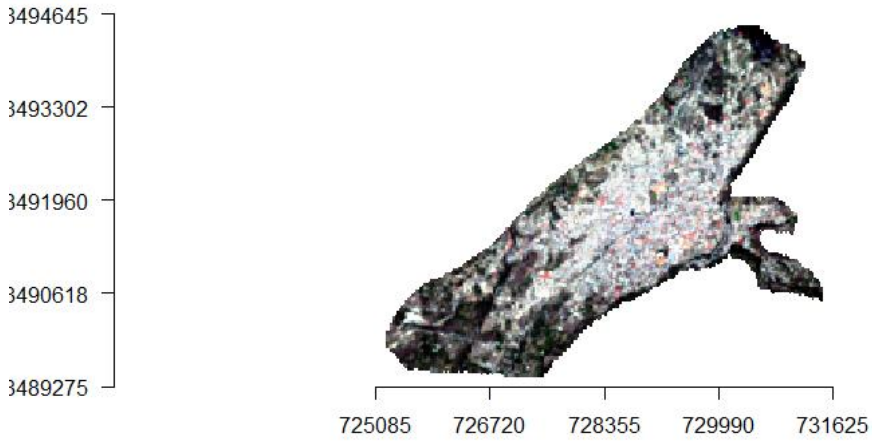


Nota. En la figura se observa el análisis espacial se utilizó las 4 bandas de la imagen satelital SPOT 5, con los que se realizó la clasificación no supervisada es decir la clasificación fue automatizado por el programa Rstudio como mostramos a continuación. Fuente: GIS.

A partir de las bandas satelitales mostradas líneas arriba podemos combinar dichas bandas para obtener la visualización del color natural que mostramos a continuación.

Figura 15

Vista de la zona de estudio en color natural

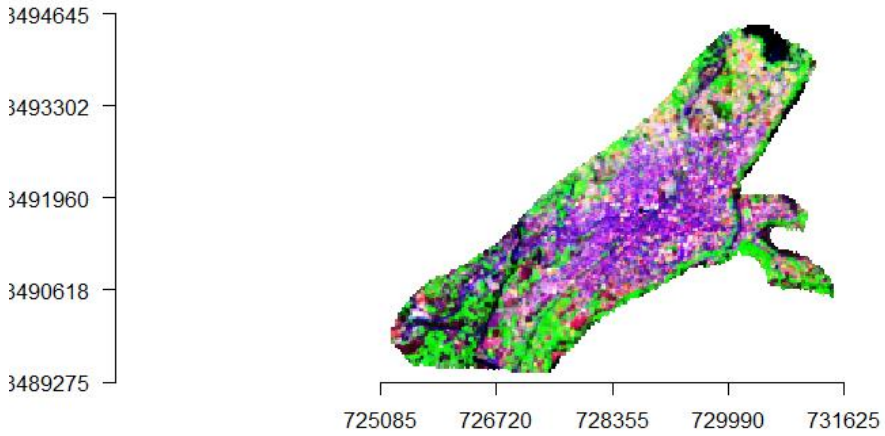


Nota. En la figura se observa la combinación del color natural para SPOT 5, se combina las bandas B3, B2, B1 en dicho orden como se mostró anteriormente, en la imagen mostrada se muestran todas las características del suelo de donde podemos elegir cuantos tipos de suelo podrían existir de manera predominante en el área de estudio.

De igual manera se combinó las bandas para obtener el falso color de la vegetación, con la combinación de las bandas B4, B3, B2 como se muestra a continuación

Figura 16

Vista de la zona de estudio en falso color de la vegetación



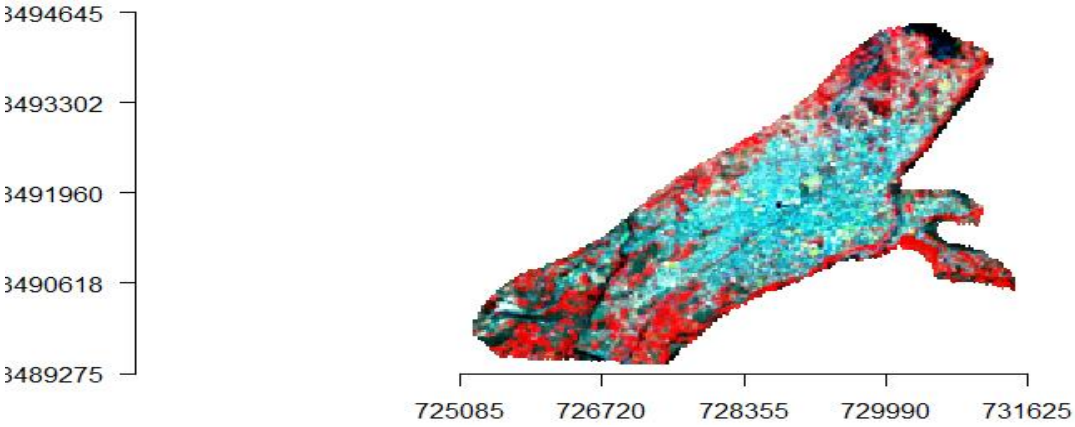
.

Nota. En la figura nos indica que alrededor de los límites de la ciudad existe zona con presencia de vegetación que pueden ser áreas verdes, huertas o terrenos de cultivo. Fuente: GIS.

Para obtener el falso color urbano, la combinación de bandas para SPOT 5, se combina las bandas B6, B5, B3 en dicho orden se obtuvo la imagen que se muestra a continuación.

Figura 17

Vista de la zona de estudio en falso color urbano

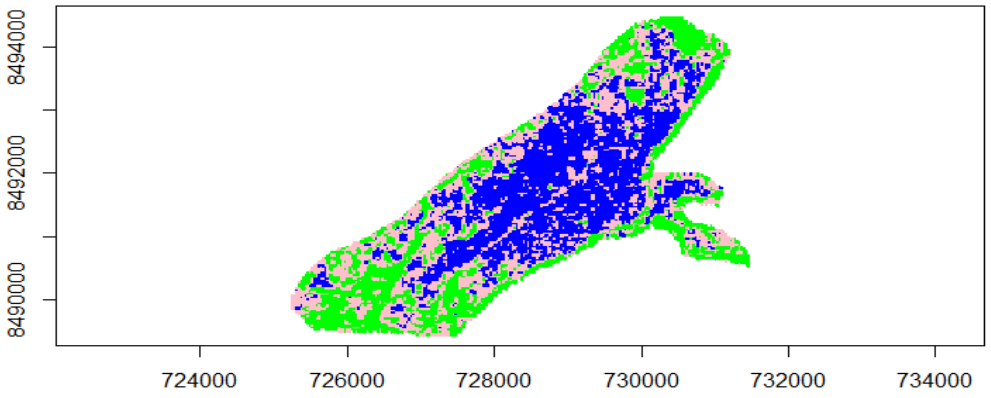


Nota. En la figura nos muestra la alta densidad poblacional, con lo cual podemos indicar las características de suelo urbano con lo que tendríamos dentro de ello debemos clasificar el asfalto, pavimento, concreto de viviendas, calaminas etc. Fuente: GIS.

De igual manera para obtener las áreas de agricultura propiamente establecidas podemos encontrar con la combinación de bandas para SPOT 5, el cual se combina las bandas B5, B4, B1 en dicho orden se obtuvo la imagen que se muestra a continuación.

Figura 18

Vista de la zona de estudio las zonas agrícolas

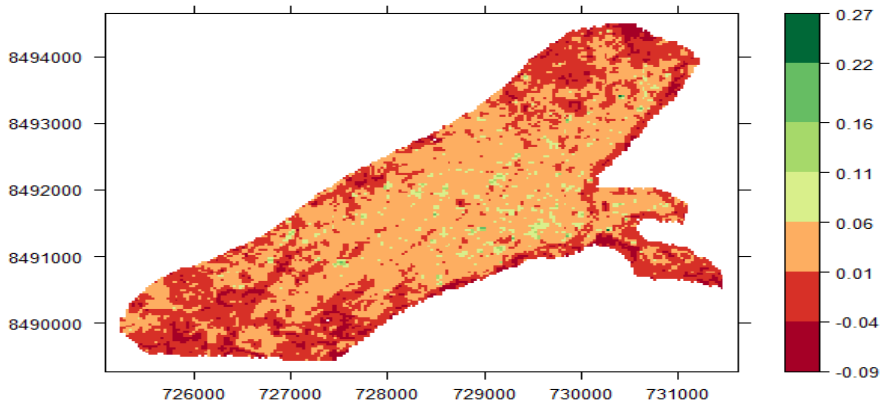


Nota. En la figura nos indica que se tiene áreas agrícolas que abarcan en las zonas urbano marginales de los límites de la ciudad. Fuente: GIS.

También podemos visualizar si aun predomina las zonas de vegetación en el área de estudio por lo que podemos visualizar el NDVI en dicha zona que se obtiene de la combinación de las bandas obteniendo la relación algebraica NDVI = (B4-B3)/(B4+B)

Figura 19

Vista de la zona de estudio de zonas agrícolas

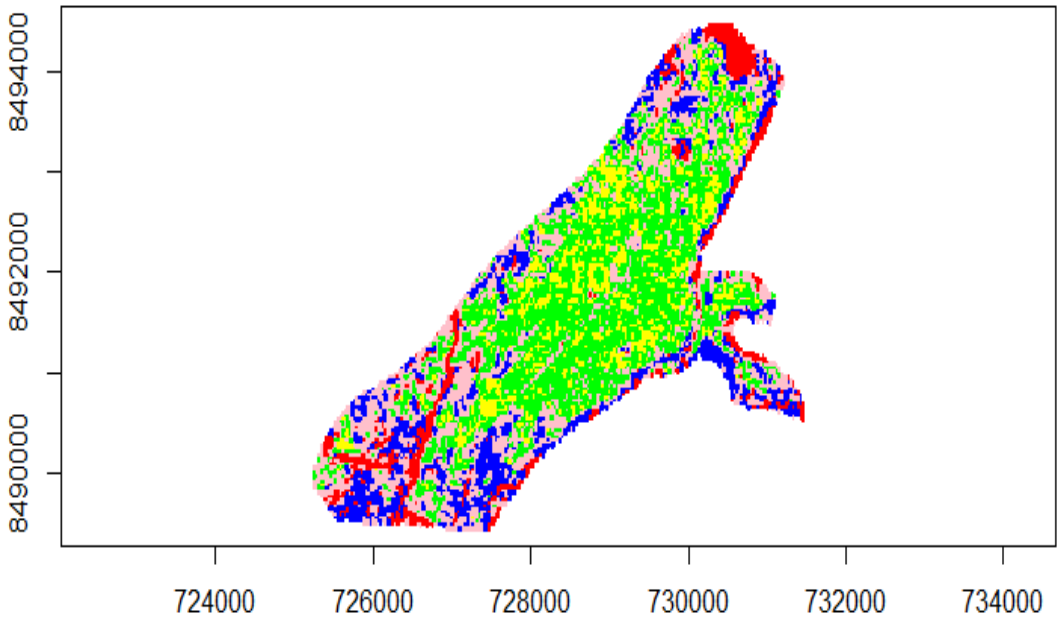


Nota. En la figura nos indica El NDVI nos indica el nivel de vegetación optima en el área de estudio, sin embargo, vemos que el índice se encuentra de la mitad para abajo, es decir menores que 0.16, lo que indica que dicha vegetación es pobre es decir cerca a su punto de marchitez. Fuente: GIS.

Con lo expuesto y verificado los diferentes tipos de uso de suelo se procedió a la Clasificación no supervisada de los usos de suelo para la ciudad de Abancay y Tamburco por lo que para ello se consideró seis clases de tipo de suelo donde se les asigno los colores "rosado", "azul", "verde", "rojo" y “amarillo" el cual el programa los clasifica automáticamente para luego identificarlos y asignarlo sus respectivas firmas espectrales como mostramos a continuación.

Figura 20

Clasificación no supervisada para la ciudad de Abancay



Nota. En la figura nos indica la existencia de seis colores que caracterizan al tipo de suelo de la zona de estudio y podemos observar que predomina más el verde y amarillo que corresponde a la zona urbana del cual podemos analizar más a detalle mediante la clasificación supervisada. Fuente: GIS.

En la figura nos indica como se manifestó existen seis colores que caracterizan al tipo de suelo de la zona de estudio y podemos observar que predomina más el verde y

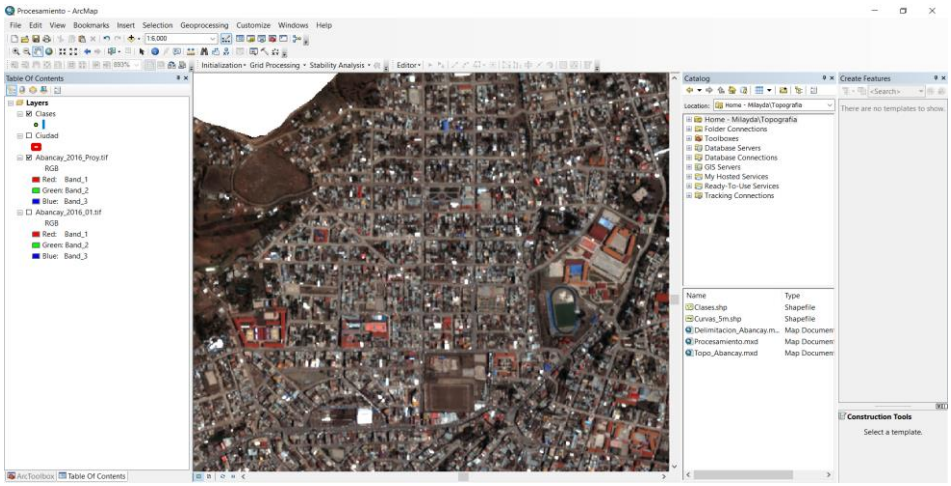
amarillo que corresponde a la zona urbana del cual podemos analizar más a detalle mediante la clasificación supervisada. Fuente: GIS.

5.1.5 Clasificación Supervisada

Para la clasificación supervisada se obtiene a partir de la imagen satelital SPOT 5 el cual muestra mayor resolución ya que la resolución es de 2 m el cual es muy importante:

Figura 21

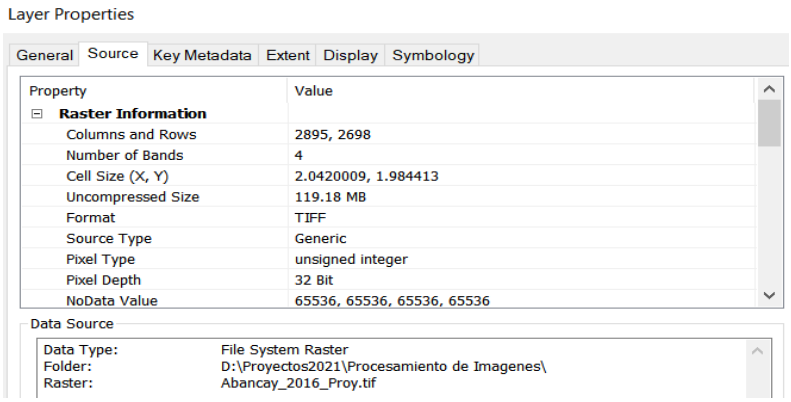
Resolución de la imagen satelital SPOT 5 de 2m de resolución



Nota. En la figura se observa la resolución de los pixeles de la imagen ráster nos permite seleccionar objetos con un error de 4 metros cuadrados, a continuación, mostramos las características de la imagen satelital SPOT 5. Fuente: GIS.

Figura 22

Características de la imagen satelital de 2m



Nota. En la figura se observa los valores de las características de imagen a 2 metros. Fuente: GIS.

a) Obtención de la firma espectral del tipo de uso de suelos

Una vez proyectado la imagen satelital a las coordenadas rectangulares UTM procedemos a establecer las firmas espectrales de los diez tipos de suelo (Tabla 16) para ello en el programa Arc Gis generamos puntos de control sobre los diferentes tipos de suelo para obtener la firma espectral, y que cuantos más puntos tengamos mayor será la aproximación del valor de dicha firma.

Figura 23

Obtención de la firma espectral del suelo con asfalto

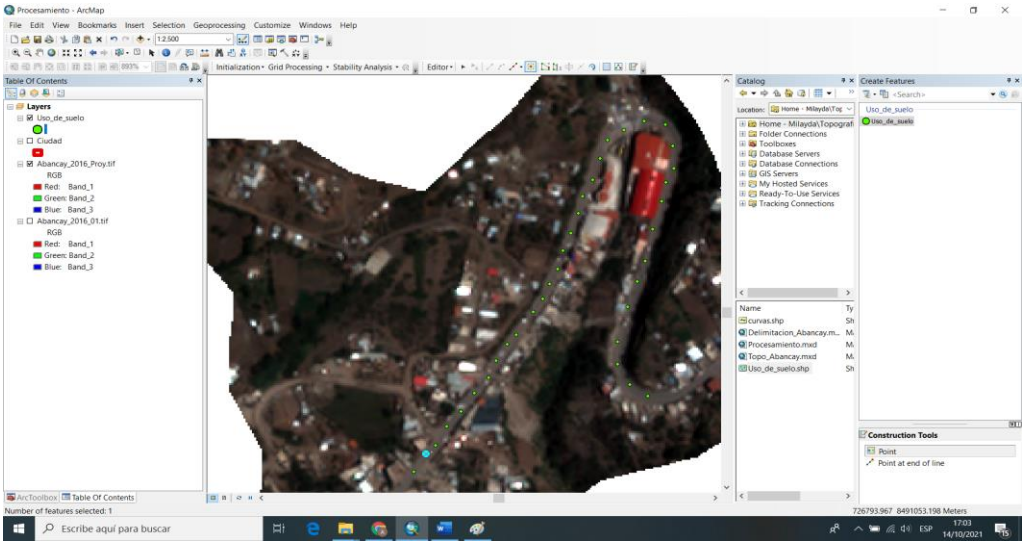


Figura 24

Obtención de la firma espectral del suelo con asfalto



Nota. En la figura se observa la identificación de uso de suelo mediante el muestreo de pixeles con similares características de la imagen. Fuente: GIS.

Figura 25

Obtención de la firma espectral del suelo con asfalto

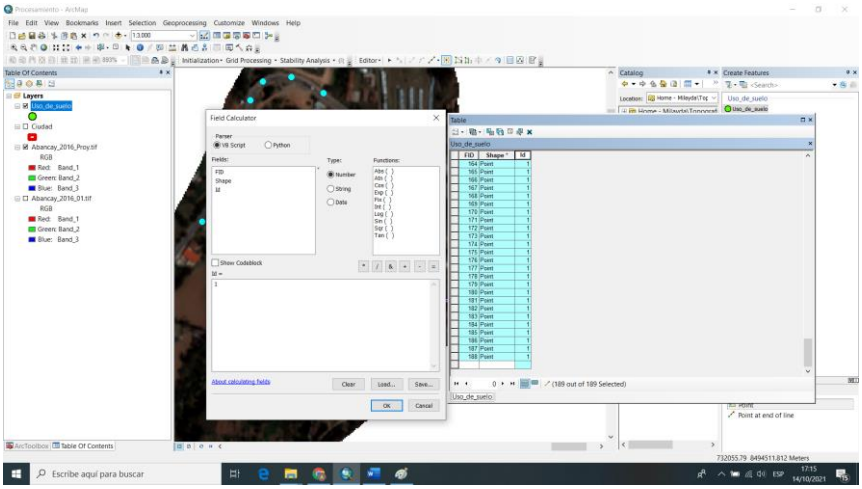


Nota. En la figura se observa la detección para el asfalto (uso de suelo) mediante puntos muestrales. Fuente: ArcGIS

De la misma manera se consideró la misma metodología para los 10 tipos de suelo, en el caso de las figuras mostradas anteriormente se realizó a manera de ejemplo para el suelo con asfalto, y así sucesivamente hasta logar los 10 tipos de suelo considerado en la tabla 3.

Figura 26

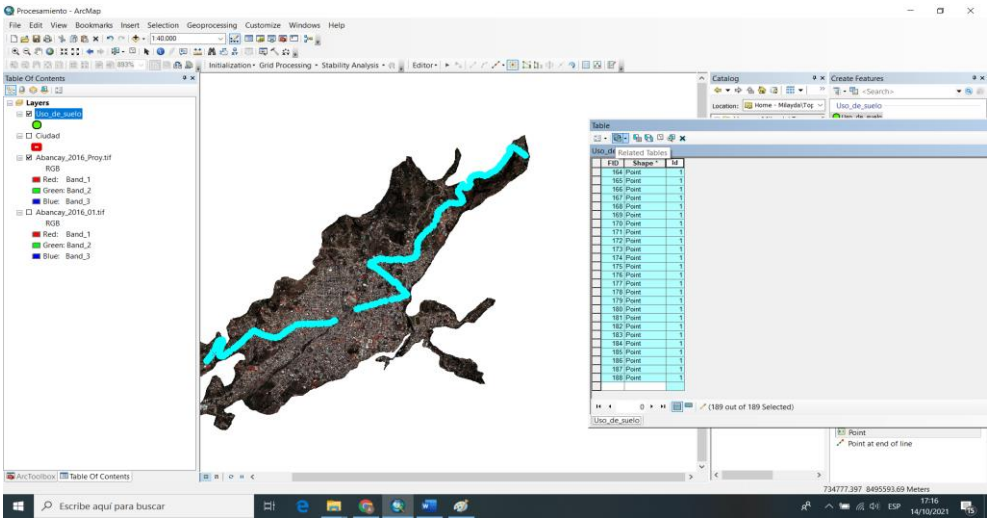
Muestreo de puntos para suelo con asfalto



Nota. En la figura se observa la cantidad de puntos muestrales del tipo de usos de suelo “Asfalto” en el programa ArcGis . Fuente: ArcGIS

Figura 27

Muestreo de puntos para suelo con asfalto

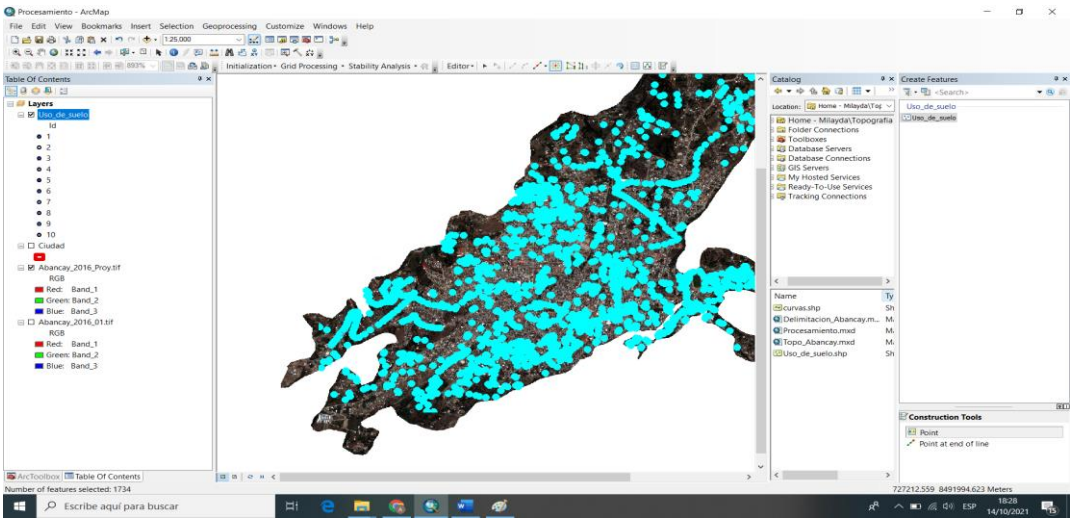


Nota. En la figura se observa la muestra de puntos que son parte del asfalto de la carretera. Fuente: GIS.

De igual manera se muestreo los diferentes usos de suelo obtenidos un total de 1733 puntos para los diferentes usos de suelo, distribuidos en toda el área de estudio (Abancay y Tamburco).

Figura 28

Total, de puntos de muestreados para el tipo de uso de suelo.

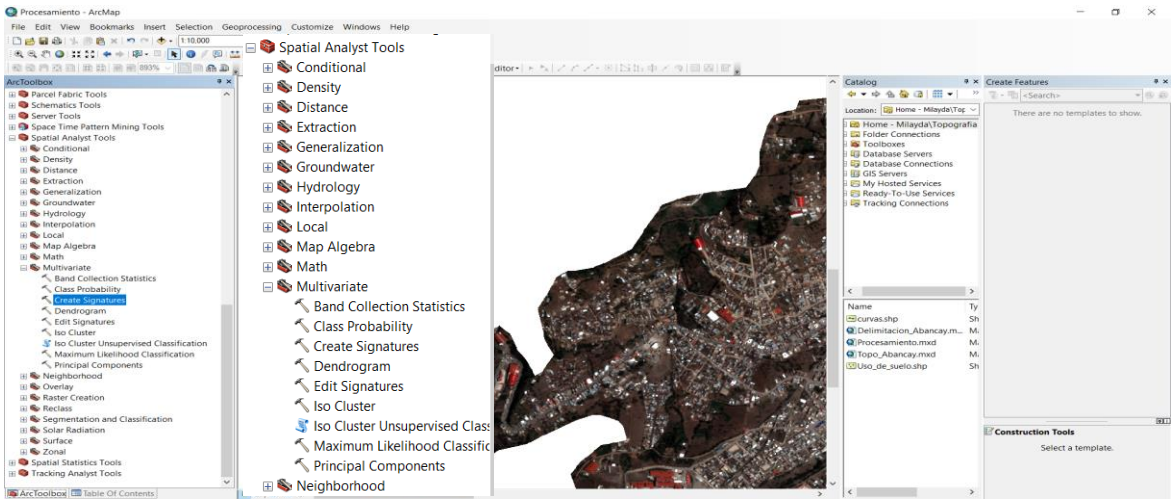


Nota. En la figura 28 se observa el total de puntos, donde muestra el tipo de uso del suelo. Fuente: GIS.

Para la clasificación supervisada, se utilizó el programa Arc GIS con el que se utiliza la herramienta de toolbox, Spatial analist tool, luego la opción multivariate para utilizar la función créate signature, el cual crea las firmas espectrales con los que realizaremos la identificación de la firma espectral.

Figura 29

Localización en el ArcGIS de la opción para crear la firma espectral



Nota. En la figura se observa la herramienta multivariate. Fuente: GIS.

Tabla 4

Diferentes tipos de uso de suelo para el cálculo de la firma espectral.

GRIDCODE	Uso_Suelos
1	Asfalto
2	Pavimento
3	Cubierta de techo marron
4	Cubierta de techo de calamina
5	Cubierta de techo azul
6	Azotea de concreto
7	Suelo desnudo
8	Camino afirmado
9	Suelo con cobertura y arboles
10	Terrenos cultivables

Nota. En la tabla se observa los diferentes tipos de uso de suelo con los que se calculó la firma espectral respectiva mediante la herramienta multivariate de ArcGIS

Luego se obtuvo en un archivo tipo texto la firma espectral de los 10 tipos de suelo de acuerdo a la siguiente tabla donde se consideraron diferentes firmas espectrales. Fuente: GIS.

A continuación, mostramos las firmas espectrales obtenidas en Arc GIS

firma_01: Bloc de notas

Archivo Edición Formato Ver Ayuda

```
# Signatures Produced by ClassSig from
#    Class-Grid __1000001
#    and Stack __1000000

#    Number of selected grids
/*          4
#    Layer-Number    Band-name
/*          1       Abancay_2016_Proy.tif\Band_1
/*          2       Abancay_2016_Proy.tif\Band_2
/*          3       Abancay_2016_Proy.tif\Band_3
/*          4       Abancay_2016_Proy.tif\Band_4

#  Type   Number of Classes   Number of Layers    Number of Parametric Layers
    1           10                  4                       4
# ====================================================================
```

1.- Firma espectral del asfalto

```
#  Class ID     Number of Cells    Class Name
        1              188         1
# Layers             1             2             3             4
# Means
                861.98404     856.97340     875.67021    1006.55319
# Covariance
    1         15337.30990   12401.14931   11352.43856   12535.97679
    2         12401.14931   10819.80143    9948.89493    9991.42121
    3         11352.43856    9948.89493    9436.30777    9000.16737
    4         12535.97679    9991.42121    9000.16737   12758.48379
# --------------------------------------------------------------------
```

2.- Firma espectral del pavimento

```
#  Class ID     Number of Cells    Class Name
        2              220         2
# Layers             1             2             3             4
# Means
               1128.78182    1072.92727    1045.96818    1310.34091
# Covariance
    1         16764.78323   13680.02972   11434.05239   15473.31216
    2         13680.02972   12084.99925   10233.13923   12090.49066
    3         11434.05239   10233.13923    9214.27752    9387.78715
    4         15473.31216   12090.49066    9387.78715   19787.85129
# --------------------------------------------------------------------
```

3.- Firma espectral de la cubierta de techo (Color Marrón)

```
#  Class ID     Number of Cells    Class Name
       3              133         3
# Layers             1             2             3             4
# Means
              1293.90977     746.21053     720.30075    1482.88722
# Covariance
    1         56775.15846   21682.14793   20190.18643   57791.44429
    2         21682.14793   28044.60686   25188.31499   26296.24362
    3         20190.18643   25188.31499   26655.81795   27091.76145
    4         57791.44429   26296.24362   27091.76145   74030.38870
# ------------------------------------------------------------------
```

4.- Firma espectral de la cubierta de techo (Calamina)

```
#  Class ID     Number of Cells    Class Name
       4               271         4
# Layers             1             2             3             4
# Means
              1207.60517    1286.53506    1307.36900    1222.19557
# Covariance
    1         307674.40279  296579.27871  279779.98327  302405.35899
    2         296579.27871  294314.89414  278952.49442  289567.48016
    3         279779.98327  278952.49442  267207.93000  271547.17942
    4         302405.35899  289567.48016  271547.17942  319931.80976
# ------------------------------------------------------------------
```

5.- Firma espectral de la cubierta de techo (Color Azul)

```
#  Class ID     Number of Cells    Class Name
       5               50          5
# Layers             1             2             3             4
# Means
               727.42000     985.46000    1255.72000    1410.46000
# Covariance
    1         168053.22816  162466.76204  136460.34449  108461.33347
    2         162466.76204  167360.37592  145671.58041  113281.00857
    3         136460.34449  145671.58041  151874.49143  131944.56000
    4         108461.33347  113281.00857  131944.56000  218357.43714
# ------------------------------------------------------------------
```

6.- Firma espectral de la cubierta de concreto (Azotea)

```
#  Class ID     Number of Cells    Class Name
        6               136         6
# Layers             1             2             3             4
# Means
               1357.60294    1339.09559    1305.63971    1425.44118
# Covariance
    1        189988.47821  181231.36416  167756.74477  185594.85054
    2        181231.36416  182978.88709  171994.69395  169822.16492
    3        167756.74477  171994.69395  164693.83219  153757.92309
    4        185594.85054  169822.16492  153757.92309  196168.76688
# ------------------------------------------------------------------
```

7.- Firma espectral de suelo desnudo

```
#  Class ID     Number of Cells    Class Name
        7               138         7
# Layers             1             2             3             4
# Means
                695.53623     658.01449     669.75362    1141.92754
# Covariance
    1         14402.51328   10251.77319    8195.93600   11256.44790
    2         10251.77319    7889.16767    6253.64593    8713.32953
    3          8195.93600    6253.64593    5140.91696    6120.22289
    4         11256.44790    8713.32953    6120.22289   32081.13340
# ------------------------------------------------------------------
```

8.- Firma espectral de camino afirmado

```
#  Class ID     Number of Cells    Class Name
        8               158         8
# Layers             1             2             3             4
# Means
                950.52532     851.15823     822.59494    1298.68354
# Covariance
    1         35200.79872   26946.99915   21750.40522   25156.93800
    2         26946.99915   21833.67544   17746.44667   19367.54721
    3         21750.40522   17746.44667   14718.72660   15094.35508
    4         25156.93800   19367.54721   15094.35508   33186.15400
# ------------------------------------------------------------------
```

9.- Firma espectral de suelo con cobertura y arboles

# Class ID	Number of Cells	Class Name		
9	272	9		
# Layers	1	2	3	4
# Means				
	400.80882	474.51838	522.22426	1232.51838
# Covariance				
1	8894.95963	6447.99615	5243.02089	2323.43895
2	6447.99615	5322.76719	4084.91653	7143.96276
3	5243.02089	4084.91653	3398.80930	2710.73202
4	2323.43895	7143.96276	2710.73202	113918.46461
# ----------				

10.- Firma espectral de terrenos cultivables

# Class ID	Number of Cells	Class Name		
10	130	10		
# Layers	1	2	3	4
# Means				
	618.55385	592.96923	601.76923	1197.18462
# Covariance				
1	16719.90793	9256.08694	7192.66369	-6150.11079
2	9256.08694	5664.89827	4315.57424	-362.53691
3	7192.66369	4315.57424	3468.39595	-1842.14311
4	-6150.11079	-362.53691	-1842.14311	56562.47728

Como paso previo a la ejecución del algoritmo de Clasificación Supervisada por Máxima Verosimilitud, se evaluó el comportamiento estadístico de las firmas espectrales asociadas a cada categoría de cobertura terrestre. Tomando como ejemplo la Clase Clas ID 1 (Tabla 4), se procesó una muestra de entrenamiento compuesta por 188 celdas (píxeles), evaluadas multidimensionalmente a través de las 4 bandas espectrales de la imagen SPOT 5.

El análisis de los valores medios (Means) evidencia la respuesta espectral característica de la cobertura, registrando niveles digitales estables en los primeros tres canales ópticos (861.98, 856.97 y 875.67, respectivamente) y manifestando un incremento distintivo en la Banda 4 (1006.55), comportamiento físico esperable debido a las propiedades de reflectancia de la superficie analizada. Por otra parte, la matriz de covarianza asociada expone la variabilidad interna de la muestra; los valores situados en

la diagonal principal definen la varianza de cada banda individual, lo cual ratifica el grado de homogeneidad interna del polígono de entrenamiento seleccionado y garantiza que las firmas espectrales son estadísticamente consistentes para guiar el proceso de clasificación automatizada en el software SIG.

Tabla 5

Resultados del cálculo de la firma espectral de los diferentes tipos de uso de suelo.

Class ID	Uso de suelo	Nro de Cell	Means			
			1	2	3	4
1	Asfalto	188	861.98	856.97	875.67	1006.55
2	Pavimento	220	1128.78	1072.93	1045.96	1310.34
3	Cubierta de techo (Marron)	133	1293.91	746.21	720.30	1482.88
4	Cubierta de techo (Calamina)	271	1207.61	1286.54	1307.37	1222.19
5	Cubierta de techo (Azul)	50	727.42	985.46	1255.72	1410.46
6	Cubierta de concreto (Azotea)	136	1357.60	1339.09	1305.63	1425.44
7	Suelo desnudo	138	695.53	658.01	669.75	1141.93
8	Camino afirmado	158	950.52	851.15	822.59	1298.68
9	Suelo con cobertura y arboles	272	400.80	474.52	522.22	1232.51
10	Terrenos cultivables	130	618.55	592.96	601.76	1197.18
	Total de muestreo	1696				

Nota. En la tabla se observa los diferentes tipos de uso de suelo con la firma espectral respectiva media, que se calculó la mediante la herramienta multivariate de ArcGIS

Cabe mencionar que para determinar la firma espectral en cada banda el programa calculo la correlación entre ellas para obtener un valor medio de cada banda y es el valor representativo de cada firma espectral la misma que servirá para calcular los diferentes tipos de suelo en una clasificación supervisada.

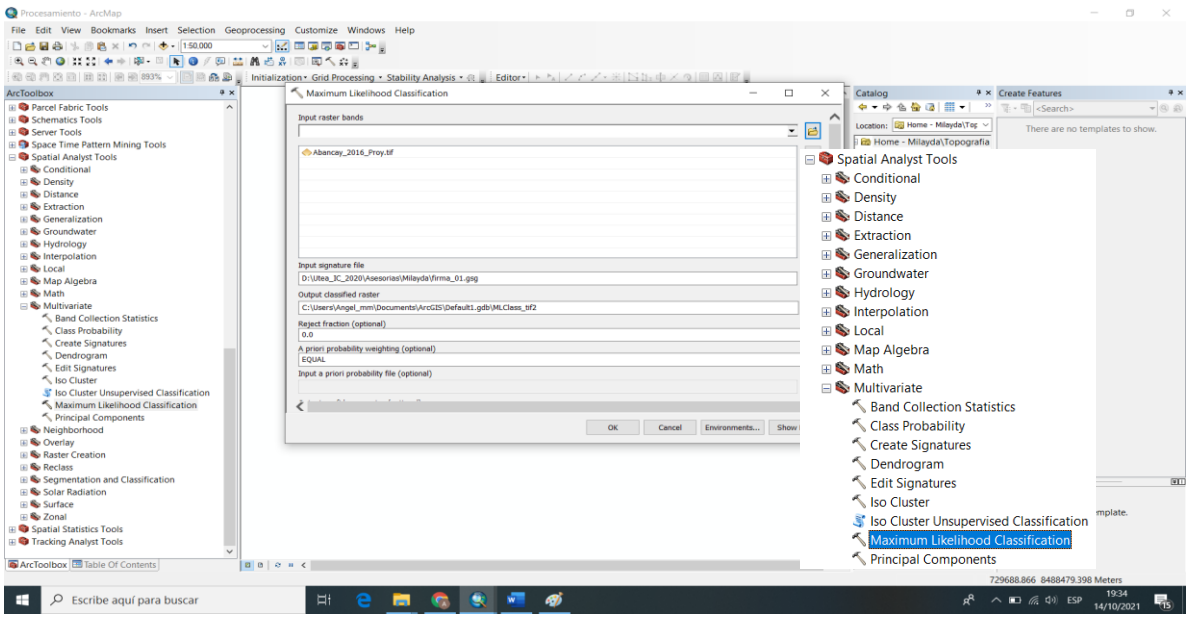
b) Reclasificación de los pixeles del tipo de uso de suelos de la firma espectral

Una vez obtenido las firmas espectrales podemos dar inicio a la Clasificación Supervisada para lo cual se utilizó además la función de “Maximun Lakelihood Clasification” para realizar la clasificación supervisada en el programa Arc GIS.

El término Maximum Likelihood Classification (Clasificación por Máxima Verosimilitud) y es uno de los algoritmos de clasificación supervisada más utilizados y robustos en la teledetección y los Sistemas de Información Geográfica (SIG), como ArcGIS

Figura 30

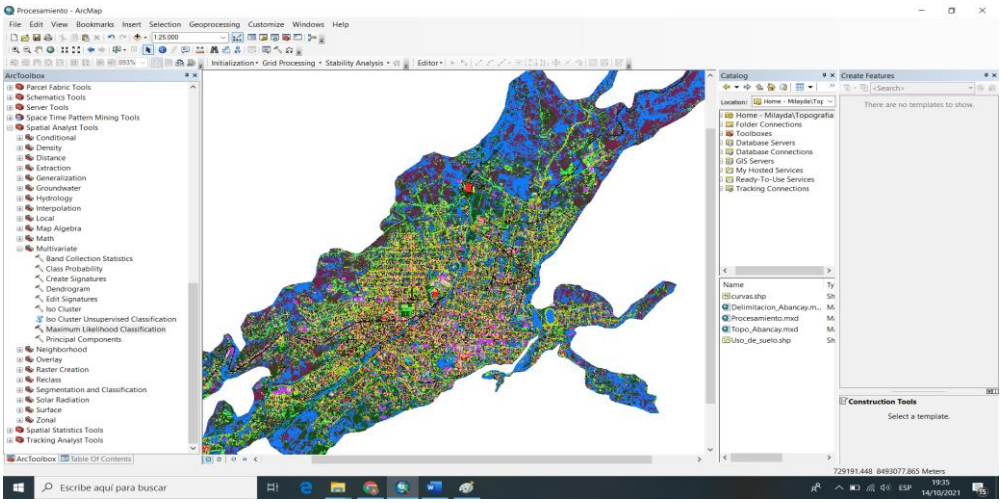
Localización en el ArcGIS de la opción para la clasificación supervisada.



Nota. En la figura se muestra proceso para obtener los diferentes tipos de suelos.

Figura 31

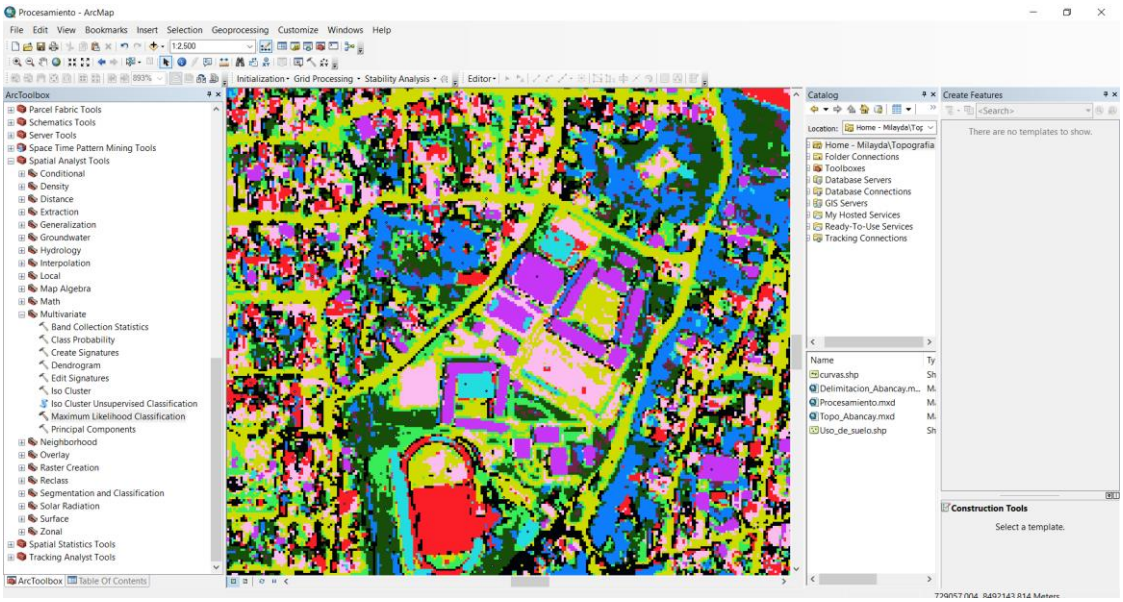
Imagen de resultados del procesamiento de la clasificación supervisada.



Nota. En la figura se muestra la clasificación según tipos de suelos por color. Imagen de resultados de clasificación supervisada

Figura 32

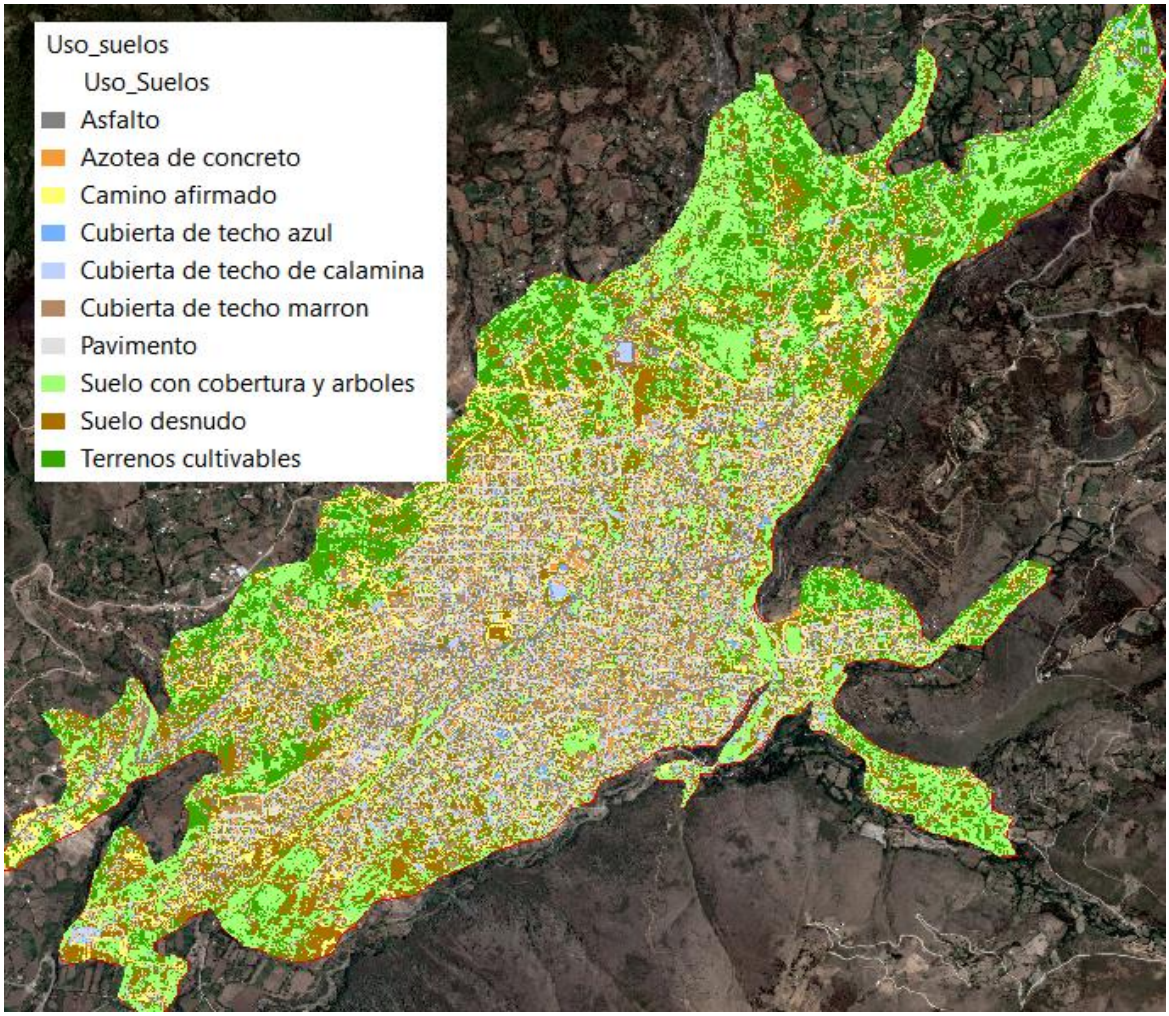
Imagen ampliada de resultados de clasificación supervisada.



Nota. En la figura se puede visualizar los diferentes tipos de suelo (10) lo cual se muestra en 10 colores diferentes indicando el tipo de suelo. Fuente: GIS.

Figura 33

Mapa final de uso de suelos obtenida



Nota. En la figura se puede visualizar la leyenda, que nos muestra en 10 colores diferentes tipos de suelo identificados mediante la clasificación supervisada. Fuente: GIS.

En base al cálculo de la firma espectral se clasifico bajo una supervisión clasificada mediante la herramienta Spatial Analysis Tool > Multivariate > Máximum Likehood Classification con el que obtuvo el mapa de uso de suelo en el que se determino también sus respectivas áreas.

Tabla 6

Se presentan las áreas obtenidas en el mapa de uso de suelo para cada tipo de suelo

GRIDCODE	Uso_Suelos	Area (km2)	%
1	Asfalto	0.9540	9.10
2	Pavimento	1.0394	9.92
3	Cubierta de techo marron	0.3021	2.88
4	Cubierta de techo de calamina	0.5275	5.03
5	Cubierta de techo azul	0.1406	1.34
6	Azotea de concreto	0.6152	5.87
7	Suelo desnudo	1.8245	17.41
8	Camino afirmado	1.0824	10.33
9	Suelo con cobertura y arboles	2.3101	22.05
10	Terrenos cultivables	1.6823	16.06
	Total	10.4782	100.00

Nota. En la tabla se observa que en el área de estudio (zonas urbanas) existe áreas de suelo sin revestidos de 65.85% mientras que las áreas de suelo urbano de 34.15% lo que nos indica que la ciudad de Abancay y Tamburco aún existe una buena infiltración y retención de la humedad de suelos. Fuente: GIS.

5.1.6 Obtención del mapa del coeficiente de escorrentía C

Para la obtención del mapa de escorrentía, se utilizó valores de escorrentía de la tabla que está en función de la pendiente, para lo cual como insumos se utilizaron el mapa de pendiente y el mapa de uso de suelo con los cuales se asignaron los coeficientes de escorrentía.

Tabla 7

Coeficientes de escorrentía C para las pendientes y usos del suelo según Villón

Uso del suelo	Pendientes		
	0-2	2-7	>7
Asfalto	0.70	0.83	0.95
Pavimento	0.70	0.83	0.95
Cubierta de techo marron	0.75	0.85	0.95
Cubierta de techo de calamina	0.75	0.85	0.95
Cubierta de techo azul	0.75	0.85	0.95
Azotea de concreto	0.50	0.60	0.70
Suelo desnudo	0.10	0.30	0.50
Camino afirmado	0.10	0.30	0.50
Suelo con cobertura y arboles	0.10	0.23	0.35
Terrenos cultivables	0.10	0.23	0.35

Nota. En la tabla se observa valores del coeficiente C en base de uso de suelo con los cuales se asignaron los coeficientes de escorrentía recomendados por Chow et al (2018) , Villon (2010).

a) Algebra de mapas como metodología para la obtención del mapa de escorrentía

El programa ArcGIS como otros programas de manejo de sistemas de información geográfica tienen muchas opciones como lo es el algebra de mapa en las que de acuerdo a lo que requerido se pueden superponer mapas para obtener la relación directa entre ellos. En nuestro caso para poder realizar el algebra de mapas se deberá trabajar con imágenes ráster para poder relacionar los mapas de pendiente y mapa de usos de suelos con los siguientes valores asignados.

Para lo cual utilizamos tablas de matrices para asignar los valores de la tabla 7 a los pixels del mapa de uso de suelos para obtener el mapa de escorrentía atravez de un análisis multicriterio en un sistema de información geográfica.

b) Asignación de valores y generación de matrices para el algebra de mapas.

Para asignar los valores utilizamos las siguientes tablas necesaria con los valores asignados

Tabla 8

Asignación de valores numéricos en el mapa de pendientes

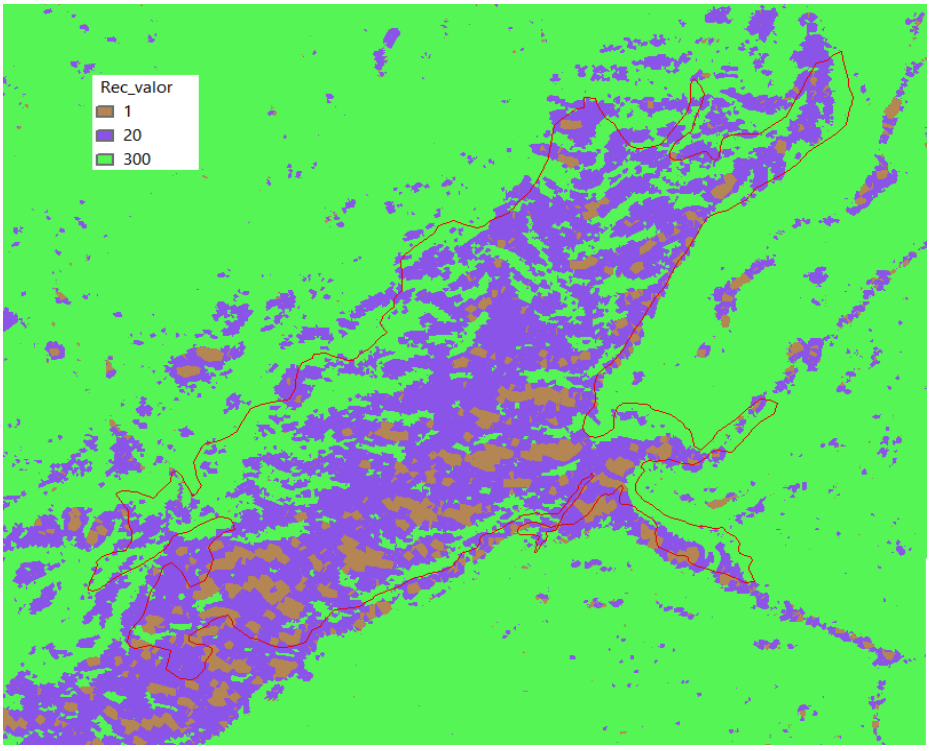
Rango de pendientes (%)	Descripción	Valor asignado
Pendiente (0-2%)	Suave	1
Pendiente (2-7%)	Medio	20
Pendiente (>7%)	Alto	300

Nota. En la tabla se observa valores de mapa de pendiente y sus valores numéricos asignado para obtener una matriz combinada entre la pendiente y el uso del suelo. Fuente: Elaboración propia.

Con la tabla anterior se obtuvo el siguiente mapa de pendientes con su valor asignado, mediante una reclasificación en ArcGIS, la misma que se muestra a continuación.

Figura 34

Valores asignados al mapa de pendientes con los valores asignados.



Nota. En la figura se observa el proceso de valores asignados al mapa de usos de suelos. Fuente: Elaboración propia.

De igual manera se asignó al mapa de uso de sueles los siguientes valores de la tabla 9 y se reclasifico mediante ArcGIS.

Tabla 9

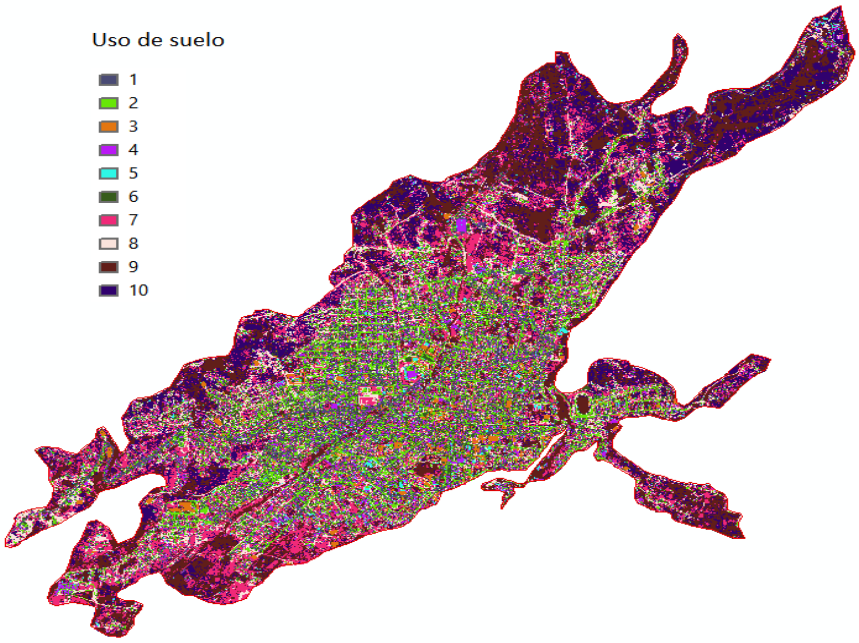
Asignación de valores numéricos en los pixeles de mapa de uso de suelo

Class ID	Uso de suelo	valores asignados
1	Asfalto	1
2	Pavimento	2
3	Cubierta de techo (Marron)	3
4	Cubierta de techo (Calamina)	4
5	Cubierta de techo (Azul)	5
6	Cubierta de concreto (Azotea)	6
7	Suelo desnudo	7
8	Camino afirmado	8
9	Suelo con cobertura y arboles	9
10	Terrenos cultivables	10

Nota. En la tabla se observa valores numéricos asignados en el mapa de uso de suelos. Fuente: Elaboración propia.

Figura 35

Valores asignados al mapa de usos de suelos con valores numéricos de la tabla 9



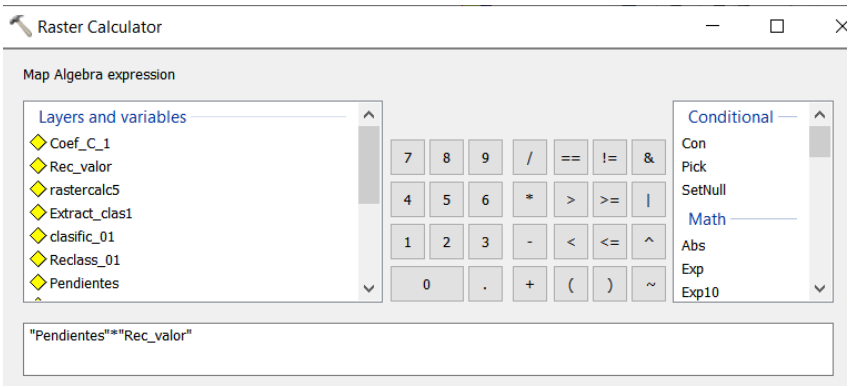
Nota. En la figura se observa los valores asignados al mapa de usos de suelos. Fuente: Elaboración propia.

c) Algebra de mapas de uso de suelo y pendientes

Una vez asignado los valores a los mapas mostrados (pendientes y usos de suelos), se procede a la multiplicación de dichas matrices utilizando el algebra de mapas (raster calculator) de Arc GIS.

Figura 36

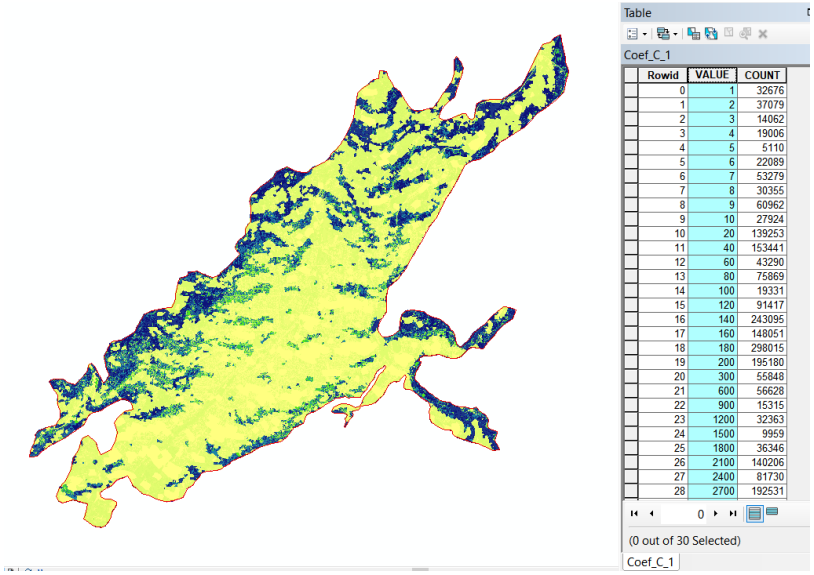
Función Ráster Calculator de Arc GIs



Nota. En la figura se observa la herramienta ráster calculator, donde se realiza la operación de multiplicar pendiente x rec_valor. Fuente: Elaboración propia.

Figura 37

Valores calculados producto de la multiplicación de las matrices



Nota. En la figura se obtuvo los valores de la matriz esperados con los que se reasigno los valores de los coeficientes c de acuerdo a las tablas presentadas anteriormente obteniendo. Fuente: Elaboración propia.

d) Resultados de algebra de mapas para caculo del coeficiente de escorrentía c

Como resultados de la multiplicación de las matrices (algebra de mapas) dichas matrices (Tabla 8 y 9) atravez de un análisis multicriterio se obtuvo otra matriz con distintos valores de los pixeles que vendrían a ser valores del coeficiente de escorrentía c en cada pixel como se muestra en la tabla 10.

Tabla 10

Resultado de la matriz de valores asignados a los pixeles del mapa de uso de suelo.

Uso de suelo	Pendientes		
	1	20	300
1	1	20	300
2	2	40	600
3	3	60	900
4	4	80	1200
5	5	100	1500
6	6	120	1800
7	7	140	2100
8	8	160	2400
9	9	180	2700
10	10	200	3000

Nota. En la tabla se observa los valores obtenidos de la multiplicación de las tablas 8 y 9 cuyos valores resultaron diferentes en función de los valores asignados de las pendientes y el uso del suelo. Fuente: Elaboración propia.

a) Reasignación de los valores asumidos con los valores reales del coeficiente de escorrentía c

Con los resultados de la tabla 10 o matriz calculada por el algebra de mapas se hizo la respectiva equivalencia con los valores del coeficiente de escorrentía reales de la tabla 7 recomendada por Villon (2010), el cual se realizo en la herramienta edición en el ArcGIS mediante la tabla 11 que se muestra a continuación.

Tabla 11

Reasignación de los valores en los pixeles calculados en la tabla 10 con la tabla 7

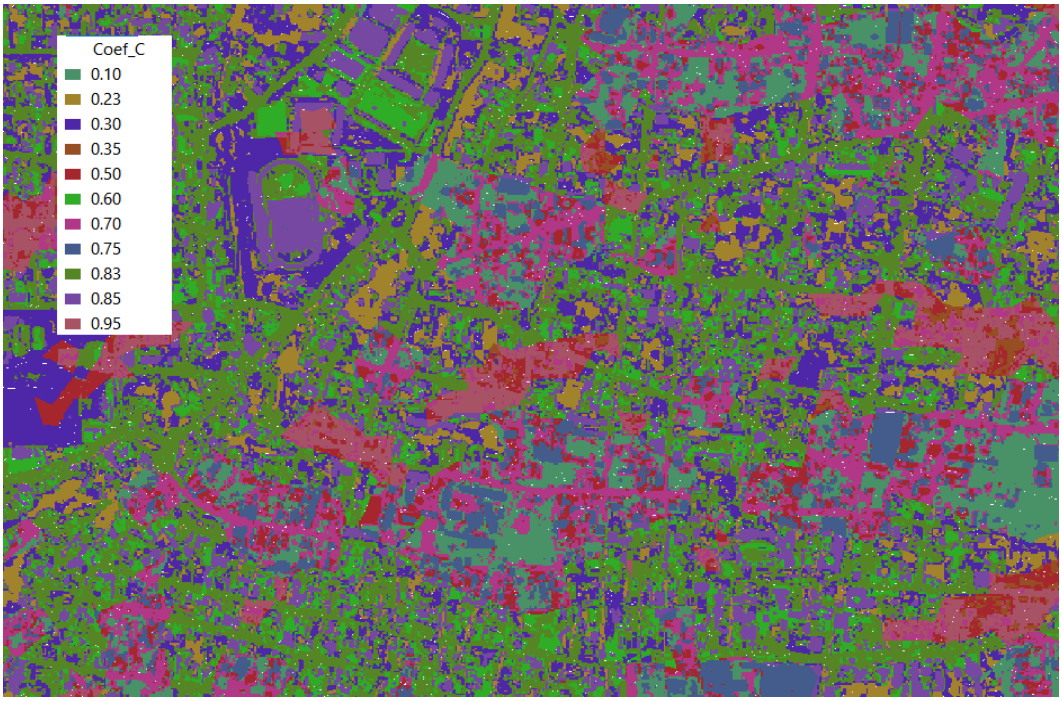
Uso de suelo	Pendientes		
	0-2	2-7	>7
1	0.70	0.83	0.95
2	0.70	0.83	0.95
3	0.75	0.85	0.95
4	0.75	0.85	0.95
5	0.75	0.85	0.95
6	0.50	0.60	0.70
7	0.10	0.30	0.50
8	0.10	0.30	0.50
9	0.10	0.23	0.35
10	0.10	0.23	0.35

Nota. En la tabla se observa el resultado de la combinación de suelos pendiente y valores de los coeficientes de escorrentía. Fuente: Elaboración propia.

Una vez reasignados los valores de escorrentía reales se obtuvo el siguiente mapa de coeficiente de escorrentía para las ciudades de Abancay y Tamburco.

Figura 38

Valores calculados producto de la multiplicación de las matrices



Nota. En la figura se obtuvo los coeficientes C, correspondiente para el uso de suelo, respectiva área y pendiente. Fuente: Elaboración propia.

Así mismo mostramos la tabla donde se realizó la asignación de valores del coeficiente de escorrentía c de acuerdo a los valores obtenidos (GRIDCODE) de la combinación de los mapas de uso de suelo y mapa de pendientes.

Figura 39

Imagen de las tablas obtenidas de los coeficientes C

Table

Coef_C_1

FID	Shape *	GRIDCODE	Coef_C	Area	Uso_suelo	Pendiente
0	Polygon	1	0.70	0.136757	Asfalto	0° a 2°
1	Polygon	2	0.70	0.155879	Pavimento	0° a 2°
2	Polygon	3	0.75	0.058517	Cubierta de techo marron	0° a 2°
3	Polygon	4	0.75	0.078806	Cubierta de techo de calamina	0° a 2°
4	Polygon	5	0.75	0.021011	Cubierta de techo azul	0° a 2°
5	Polygon	6	0.50	0.090870	Azotea de concreto	0° a 2°
6	Polygon	7	0.10	0.223759	Suelo desnudo	0° a 2°
7	Polygon	8	0.10	0.125936	Camino afirmado	0° a 2°
8	Polygon	9	0.10	0.255133	Suelo con cobertura y arboles	0° a 2°
9	Polygon	10	0.10	0.113623	Terrenos cultivables	0° a 2°
10	Polygon	20	0.83	0.583446	Asfalto	2° a 7°
11	Polygon	40	0.83	0.645610	Pavimento	2° a 7°
12	Polygon	60	0.85	0.180137	Cubierta de techo marron	2° a 7°
13	Polygon	80	0.85	0.314496	Cubierta de techo de calamina	2° a 7°
14	Polygon	100	0.85	0.078972	Cubierta de techo azul	2° a 7°
15	Polygon	120	0.60	0.376038	Azotea de concreto	2° a 7°
16	Polygon	140	0.30	1.017395	Suelo desnudo	2° a 7°
17	Polygon	160	0.30	0.615814	Camino afirmado	2° a 7°
18	Polygon	180	0.23	1.248341	Suelo con cobertura y arboles	2° a 7°
19	Polygon	200	0.23	0.806588	Terrenos cultivables	2° a 7°
20	Polygon	300	0.95	0.233494	Asfalto	> 7°
21	Polygon	600	0.95	0.237281	Pavimento	> 7°
22	Polygon	900	0.95	0.063523	Cubierta de techo marron	> 7°
23	Polygon	1200	0.95	0.134374	Cubierta de techo de calamina	> 7°
24	Polygon	1500	0.95	0.040767	Cubierta de techo azul	> 7°
25	Polygon	1800	0.70	0.148995	Azotea de concreto	> 7°
26	Polygon	2100	0.50	0.583090	Suelo desnudo	> 7°
27	Polygon	2400	0.50	0.340778	Camino afirmado	> 7°
28	Polygon	2700	0.35	0.805679	Suelo con cobertura y arboles	> 7°
29	Polygon	3000	0.35	0.763088	Terrenos cultivables	> 7°

Nota. En la figura se obtuvo los coeficientes C, correspondiente para el uso de suelo, respectiva área y pendiente. Fuente: Elaboración propia.

Una vez obtenido el mapa de escorrentía C se procedió a cuantificar las áreas respectivas para poder realizar la descripción del comportamiento de esta variable que se encuentra en las zonas urbanas y periurbanas de las ciudades de Abancay y Tamburco como se muestra en la tabla 12, en el cual del área considerado para el estudio predomina con 57.03% las áreas verdes y suelos desnudos o con cobertura vegetal, 18.99 % áreas de cobertura y techos de concreto y 23.97% áreas pavimentadas y con asfaltado que vendrían a ser las vías y calles de las ciudades mencionadas.

Tabla 12

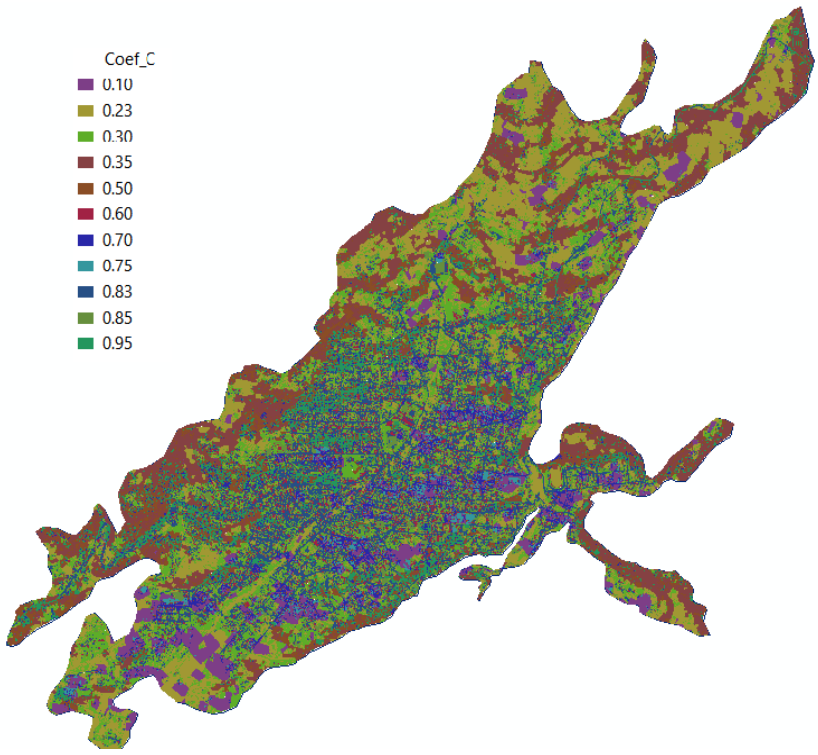
Áreas de los coeficientes C en el ámbito del estudio

Coef_C	Area_Km2	%	Uso del suelo
0.10	0.718	6.86	Suelo desnudo y cobertura vegetal
0.23	2.055	19.61	Suelo desnudo y cobertura vegetal
0.30	1.633	15.59	Suelo desnudo y cobertura vegetal
0.35	1.569	14.97	Suelo desnudo y cobertura vegetal
0.50	1.015	9.68	Azotea de concreto
0.60	0.376	3.59	Coberturas y azoteas de concreto
0.70	0.442	4.21	Coberturas y azoteas de concreto
0.75	0.158	1.51	Coberturas y azoteas de concreto
0.83	1.229	11.73	Asfalto y pavimento
0.85	0.574	5.47	Asfalto y pavimento
0.95	0.709	6.77	Asfalto y pavimento
Total	10.4782	100	

Nota. En la tabla se observa los coeficientes C, con su correspondiente área en Km2 y en Porcentaje (%). Fuente: Elaboración propia.

Figura 40

Mapa de los coeficientes c para las ciudades de Abancay y Tamburco



Nota. En la figura se muestra los sectores de coeficientes c con sus respectivos colores para las ciudades de Abancay y Tamburco. Fuente: Elaboración propia.

5.2 Discusión

5.2.1 Discusión crítica de resultados

Respecto a la validación metodológica para la estimación del coeficiente de escorrentía superficial en escala urbana, los hallazgos de la presente investigación demuestran la viabilidad de combinar herramientas de teledetección con datos de campo. Los resultados del área de estudio arrojaron que predominan las áreas verdes y suelos desnudos con un 57.03%, seguidos por un 23.97% de áreas pavimentadas o asfaltadas y un 18.99% de techos o coberturas de concreto. Esta distribución espacial concuerda con lo planteado por Carrión y Guajala (2024), quienes sostienen que la estimación ponderada del coeficiente (C) es un requisito crítico frente a variaciones heterogéneas de la cobertura del suelo, ya que la respuesta hidrológica global no es uniforme. Asimismo, estos porcentajes guardan relación con el enfoque del Equipo de Proyecto de la Universidad Nacional de San Martín (2024) en Argentina, cuyos modelos en cuencas urbanas demostraron la importancia de aislar con precisión matemática los porcentajes de suelo altamente antropizado e impermeable (como el 42.96% sumado de vías y techos en Abancay y Tamburco) para calibrar las respuestas de drenaje. A diferencia de las cuencas macroescala evaluadas por Pérez Serrano (2023) en el río Tajo, donde los cambios son principalmente agrícolas o forestales, la escala de subcuenca urbana analizada aquí exige un nivel de detalle milimétrico, validando que el uso de metodologías distribuidas aporta mayor fiabilidad que los promedios globales.

En cuanto al análisis topográfico y la determinación del mapa de pendientes a partir de las curvas de nivel, la estructuración de rangos específicos de inclinación (0-2%, 2-7% y mayores al 7%) resultó determinante para enlazar las tablas de valores teóricos con la geografía de Abancay y Tamburco. Este procedimiento técnico se alinea rigurosamente con la metodología expuesta a nivel nacional por Montoya Rojas (2020) en el Cusco y por Sandoval Ponce (2021) en Huánuco. Ambos autores coinciden en que la intersección digital de un modelo de elevación o pendiente con las capas vectoriales es el paso metodológico insustituible para automatizar la obtención del parámetro de escorrentía. No obstante,

mientras que estudios como el de Céspedes Estela (2021) en entornos urbanos planos priorizan únicamente el tipo de superficie edificado, los resultados de este trabajo reafirman el postulado local de Jara Pacheco y Merma Huallpa (2023) en Apurímac, quienes evidencian que en la accidentada geografía andina la pendiente es la variable que rige la velocidad de concentración del flujo. Al clasificar y procesar adecuadamente estos tres rangos en el software SIG, se logra corregir las distorsiones teóricas que a menudo ocurren al aplicar tablas estandarizadas en zonas de fuerte relieve, otorgando consistencia científica a los mapas generados para el año 2025.

Finalmente, respecto a la generación del mapa de uso del suelo mediante teledetección e imágenes satelitales, la identificación detallada de hasta 10 categorías (asfalto, pavimentos, cubiertas de policarbonato/tejas, calaminas azules y galvanizadas, lozas de concreto, suelo desnudo, caminos afirmados, coberturas arbóreas y terrenos cultivables) representa un avance cartográfico sustancial frente a modelos tradicionales. Esta segmentación minuciosa supera el nivel de categorización básica empleado por Intriago y Cevallos (2024) y se asimila a la rigurosidad planteada por el Instituto de Geología y Geofísica (2025) en Nicaragua, donde se demostró que el tipo específico de material de techumbre y calzada altera directamente la impermeabilidad urbana. Al contrastar estos resultados con el estudio de Arellano y Jiménez (2023) en Áncash, se observa que la precisión en la textura y el color de las imágenes satelitales permite diferenciar cubiertas de calamina o policarbonato de las estructuras de concreto rígido. Esto es de vital importancia para aplicar los coeficientes de escorrentía teóricos de Aparicio (1999), dado que cada material posee un umbral de retención y rugosidad hidrodinámica distinto. En consecuencia, la discriminación de estas 10 coberturas garantiza que el mapa final del coeficiente "C" refleje con fidelidad el comportamiento real del escurrimiento pluvial en las ciudades de Abancay y Tamburco, sirviendo como una herramienta moderna para la planificación urbana y el diseño de futuros sistemas de drenaje.

5.2.2 Prueba de hipótesis

No se realizó ninguna prueba estadística, sin embargo, las herramientas informáticas nos permitieron generar el mapa de coeficientes de escorrentía C y a la vez identificar dichos valores del coeficiente de escorrentía en las ciudades de Abancay y Tamburco – 2025.

Aquí tampoco no se realizó ninguna prueba estadística, sin embargo, también las herramientas informáticas nos permitieron generar el mapa de pendientes del suelo apartir de la topografía y curvas de nivel en las ciudades de Abancay y Tamburco – 2025.

Así mismo también las herramientas informáticas nos permitieron determinar el mapa del uso del suelo y analizar la influencia del valor del coeficiente de escorrentía según su pendiente en las ciudades de Abancay y Tamburco – 2025.

VI. CONCLUSIONES

Respecto a la generación del mapa de escorrentía como objetivo general concluimos que quedan validadas ambas metodologías para la estimación de valores de coeficiente de escorrentía a escala de subcuenca urbana, en zonas de baja pendiente, y con herramientas de teledetección combinadas con información de terreno obteniéndose valores para el área de estudio considerado que predominan con un 57.03% las áreas verdes y suelos desnudos o con cobertura vegetal, 18.99% áreas de cobertura y techos de concreto y 23.97% áreas pavimentadas y con asfaltado que vendrían a ser las vías y calles de las ciudades mencionadas.

La información recopilada de las curvas de nivel y aspectos topográficos en la zona de estudio ha sido determinante para obtener el mapa de pendientes mediante herramientas informáticas de Sistemas de Información Geográfica ya que nos ha permitido construir los rangos de las pendientes utilizados en tablas pre establecidos para relacionar con el uso de suelo en base de los rangos de pendientes de 0-2%, 2-7% y mayores a 7%, ya que en base a dichos rango se pudo conocer las valores teóricos del coeficiente de escorrentía en la ciudad de Abancay y Tamburco - 2025.

De igual manera la información recopilada para generar el mapa del uso del suelo para la zona de estudio a partir de imágenes satelitales y con la ayuda de las herramientas informáticas aplicando conceptos de teledetección se ha podido identificar hasta 10 tipos de uso de suelo tales como asfalto, pavimentos, cubierta de techos de policarbonato y tejas (marron) cubiertas de calamina azul, cubierta de calamina galvanizada, azoteas de loza de concreto, suelo desnudo, caminos afirmados, suelos con coberturas y árboles y terrenos cultivables nos permitieron identificar el valor del coeficiente de escorrentía en la ciudad de Abancay y Tamburco- 2025.

VII. RECOMENDACIONES

Para la obtención del mapa del coeficiente de escorrentía C, es necesario efectuar los ajustes en la selección de los puntos de interés a partir de la inspección visual de las áreas que evidenciaban mayores discrepancias en los valores de la firma espectral de los elementos conformantes de las zonas urbanas y que un examen acucioso podemos aumentar la precisión de los valores mediante la exclusión de píxeles que no correspondían a la clase analizada y que incidían en la distorsión de los valores obtenidos.

Es importante señalar que la metodología convencional requiere un levantamiento detallado y exhaustivo de la zona urbana, lo que implica un elevado consumo de tiempo tanto en actividades de gabinete como en trabajo de campo. En contraste, las metodologías alternativas mediante sistemas de información geográfica constituyen una propuesta metodológica eficiente, al permitir agilizar el proceso de estimación sin comprometer la rigurosidad del análisis.

La incorporación de más clases o tipos de uso de suelo en correspondencia con las áreas de mayor densidad de la zona urbana, localizadas en el microcentro y en la zona periurbana o anillo perimetral, particularmente en barrios urbano-marginales, de la ciudad, nos permitirían conocer la incertidumbre de los valores de la escorrentía ya que dado que este nivel de análisis aún no se encuentra plenamente delimitado, debido a los procesos de expansión poblacional continua y no planificada.

VIII. REFERENCIAS

Airbus Defence and Space. (2020). SPOT 5. https://www.intelligence-airbusds.com/en/8290-spot-5.html

ArcGIS Pro. (2025). Cómo funcionan las curvas de nivel. Esri. https://pro.arcgis.com/es/pro-app/latest/tool-reference/3d-analyst/how-contouring-works.htm

Arellano, K., & Jiménez, R. (2023). Diseño de drenaje vial y optimización de la gestión hídrica superficial [Tesis de grado, Universidad Nacional del Santa]. Repositorio Institucional UNS. http://repositorio.uns.edu.pe

Arias, F. G. (2012). El proyecto de investigación: Introducción a la metodología científica (6.ª ed.). Editorial Episteme.

Canales Torres, M. A. (2015). Modelación del proceso precipitación–escorrentía en la cuenca del río Ica [Tesis de maestría, Universidad Nacional Agraria La Molina]. Repositorio Institucional UNALM. https://hdl.handle.net/20.500.12996/1864

Cano, C., Andreoli, A., Arumí, J. L., & Rivera, D. (2014). Uso de imágenes de satélite para evaluar los efectos de cambio de cobertura de suelo en la escorrentía directa de una cuenca andina. Tecnología y Ciencias del Agua, 5(4), 145–151. https://www.redalyc.org/pdf/3535/353532522009.pdf

Carrión, C., & Guajala, X. (2024). Diseño hidrológico para el embalse “Tres Piedras”, ubicado en la provincia del Azuay [Trabajo de titulación, Universidad del Azuay]. Repositorio Institucional UAZUAY. http://dspace.uazuay.edu.ec/handle/datos/16142

Ccarhuas Ruiz, Y., & Huisa, J. (2019). Optimización del drenaje pluvial en el casco urbano del distrito de Tamburco–Abancay, 2018 [Tesis de pregrado, Universidad Tecnológica de los Andes]. Repositorio Digital UTEA. https://repositorio.utea.edu.pe/items/026fabc7-5448-47dc-a60b-a854dc5a2117

Céspedes Estela, J. (2021). Evaluación de la infraestructura de drenaje pluvial urbano mediante modelos hidrológicos distribuidos [Tesis de maestría, Universidad de Huánuco]. Repositorio Institucional UDH. http://repositorio.udh.edu.pe

Chiarito, E., Zimmermann, E., & Méndez Zacarías, S. (2018). Metodologías para la estimación del coeficiente de escorrentía en áreas urbanizadas mediante teledetección. Cuadernos del CURIHAM, 24, 25–36. https://rephip.unr.edu.ar/handle/2133/17585

Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1988). Applied hydrology (1.ª ed.). McGraw-Hill.

Comité de Ética en Investigación. (2018). Guía de buenas prácticas en investigación. Secretaría de Salud, México. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/422291/Guia_Buenas_Practicas.pdf

Cortez, W., & Condori, E. (2015). Ineficiencia en la calidad de vida de los habitantes debido a la desafortunada administración de las aguas pluviales en los vecindarios de Patibamba Baja y Pueblo Joven Centenario de Apurímac [Trabajo de grado, Universidad Tecnológica de los Andes]. Repositorio Digital UTEA. https://repositorio.utea.edu.pe

Creswell, J. W. (2014). Research design: Qualitative, quantitative, and mixed methods approaches (4.ª ed.). Sage Publications.

Diaz Carvajal, A., & Mercado Fernández, T. (2017). Determinación del número de curva en la subcuenca de Betancí (Córdoba, Colombia) mediante teledetección y SIG. Ingeniería y Desarrollo, 35(2), 200–218. https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=85252030011

Equipo de Proyecto UNSAM. (2024). Diseño de un sistema de drenaje sostenible para la gestión de agua pluvial en la cuenca Radio Antiguo, Ciudad Autónoma de Buenos Aires [Informe de proyecto, Universidad Nacional de San Martín]. Repositorio UNSAM. https://unsam.edu.ar/investigacion/drenaje_buenos_aires

Esri. (2025a). Comprender la reclasificación—ArcGIS Pro. https://pro.arcgis.com/es/pro-app/latest/tool-reference/spatial-analyst/understanding-reclassification.htm

Esri. (2025b). Introduction to ArcGIS. https://architecture.arcgis.com/en/overview/introduction-to-arcgis/introduction.html

Esri. (2025c). Raster cell size (resolution). ArcGIS Pro Documentation. https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/help/analysis/raster-functions/cell-size.htm

Esri. (2025d). Slope map. GIS Dictionary. https://support.esri.com/en-us/gis-dictionary/slope-map

Esri. (2025e). Understanding multivariate classification—ArcMap. https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/latest/tools/spatial-analyst-toolbox/understanding-multivariate-classification.htm

FAO. (2004). Textura del suelo (Capítulo 6). Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. https://www.fao.org/fishery/static/FAO_Training/FAO_Training/General/x6706s/x6706s06.htm

Flores Juro, G., & Tejada, M. (2017). Instalación del sistema de drenaje pluvial en la ciudad de Chuquibambilla, provincia de Grau – Apurímac [Tesis de grado, Universidad Tecnológica de los Andes]. Repositorio Digital UTEA. https://repositorio.utea.edu.pe/items/fbcf8b42-f1cd-4197-a2f8-c6ee7e731268

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2005). Soil classification. FAO. https://www.fao.org/soils-portal/data-hub/soil-classification/en/

Gobierno de México. (2009). Metodología de la investigación. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/133491/METODOLOGIA_DE_INVESTIGACION.pdf

Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, P. (2014). Metodología de la investigación (6.ª ed.). McGraw-Hill.

Instituto de Geología y Geofísica. (2025). Amenaza por inundación pluvial en una microcuenca urbana de Managua, Nicaragua. En Gestión del riesgo de desastres en América Latina y el Caribe (pp. 91–114). Comunicación Científica. https://comunicacion-cientifica.com/doi/cc218/218-03.pdf

Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico. (2019). Mapa de suelos del Perú a escala 1:100 000. INGEMMET. https://www.ingemmet.gob.pe

Intriago, J. L., & Cevallos, E. H. (2024). Implementación de estrategias de manejo sostenible en la microcuenca Visquije, Santa Ana: Uso de atenuadores de escorrentía y tecnologías SIG. Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, 8(3), 9711–9732. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v8i3.12112

Jara Pacheco, F., & Merma Huallpa, H. (2023). Modelamiento hidrológico y cálculo de parámetros geomorfológicos en subcuencas del departamento de Apurímac [Tesis de grado, Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco]. Repositorio Institucional UNSAAC. http://repositorio.unsaac.edu.pe

Jayo Jiménez, P. S. (2011). Modelación de la relación precipitación–escorrentía en la cuenca del río Mala mediante el modelo Precaud v.1.0 [Tesis de grado, Universidad Nacional Agraria La Molina]. Repositorio Institucional UNALM. https://hdl.handle.net/20.500.12996/758

Kothari, C. R. (2004). Research methodology: Methods and techniques (2.ª ed.). New Age International.

Luna Chávez, R. A., & Meza Aréstegui, P. R. (2019). Evaluación de riesgos ante precipitaciones intensas y modelamiento hidrológico de la quebrada Huarangal, limitante entre los distritos de Paucarpata y Mariano Melgar, provincia de Arequipa, región Arequipa [Tesis de grado, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa]. Repositorio Institucional UNSA. https://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/8674

Ministerio del Ambiente. (2020). Mapa de cobertura vegetal del Perú 2019. Sistema Nacional de Información Ambiental (SINIA). https://sinia.minam.gob.pe/#/

Montoya Rojas, R. (2020). Análisis multitemporal del uso de suelo y cobertura vegetal mediante el uso de herramientas SIG aplicados a la cuenca de Chuyapi - Santa Ana - La Convención – Cusco [Tesis de grado, Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco]. ALICIA CONCYTEC / Repositorio Institucional.

https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UACI_e3c63038af760f5395116863928e2550

Natural Resources Conservation Service. (2004). National Engineering Handbook, Part 630: Hydrology, Chapter 9: Runoff (NEH-630_09). U.S. Department of Agriculture. https://www.nrcs.usda.gov/sites/default/files/2022-06/NEH-630-Ch9.pdf

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, & Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. (1999). El futuro de nuestra tierra: Enfrentando el desafío. Directrices para la planificación integrada para la gestión sostenible de los recursos terrestres. Roma: FAO. https://www.fao.org/4/x3810e/x3810e00.htm

Pérez Serrano, A. (2023). Efectos de los cambios del uso del suelo en la hidrología y la estimación del coeficiente de escorrentía en la cuenca del Tajo (M. Molina Navarro, Asesor) [Tesis de máster, Universidad de Alcalá]. Repositorio Institucional UAH. https://alcala.es/handle/10017/perez_serrano_2023

Pizarro Tapia, R., Tapia Cornejo, M., Román Arellano, L., Jordán Díaz, C., & Farías Daza, C. (2006). Coeficientes de escorrentía instantáneos para la cuenca del río Tutuvén, VII Región del Maule, Chile. Bosque, 27(2), 83–91. https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=173113286002

QGIS Development Team. (2021). QGIS user guide: Hydrological analysis algorithms. QGIS Project. https://docs.qgis.org/3.40/en/docs/training_manual/index.html

Rivasplata Flores, L. F., & Méndez Cruz, G. V. (2019). Generación de escorrentía superficial a partir de información climática en la cuenca de la quebrada Huertas–Chilete, Cajamarca [Tesis de grado, Universidad Nacional de Cajamarca]. Repositorio Institucional UNC. https://repositorio.unc.edu.pe/handle/20.500.14074/3580

Rodríguez Roa, J. (s. f.). Informe 8: Cálculo de pendientes [Documento de trabajo]. Facultad de Ingeniería, Universidad Militar Nueva Granada.

Sandoval Ponce, L. (2021). Modelamiento hidrológico superficial mediante Sistemas de Información Geográfica [Tesis de grado, Universidad de Huánuco]. Repositorio Institucional UDH. http://repositorio.udh.edu.pe

Scioli, C. C. (2016). Un nuevo índice de similitud hidrológica para la simulación precipitación–escorrentía en sistemas de llanura [Tesis de grado, Universidad Nacional del Litoral]. Repositorio Institucional UNL. https://bibliotecavirtual.unl.edu.ar/handle/11185/944?show=full

Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú. (2021). Boletín climático anual 2021. SENAMHI. http://www.senamhi.gob.pe

Silva Balaguera, A. L., Pedraza Flores, L. A., & Gualdrón Alfonso, D. F. (2023). Fundamentos de investigación en Ingeniería Civil. Ecoe Ediciones. https://content.e-bookshelf.de/media/reading/L-19258515-62f2704878.pdf

U.S. Geological Survey. (2019). Infiltration and the water cycle. USGS. https://www.usgs.gov/special-topics/water-science-school/science/infiltration-and-water-cycle

U.S. Geological Survey. (2021). What is a digital elevation model (DEM). USGS. https://www.usgs.gov/core-science-systems/ngp/3dep/what-digital-elevation-model-dem

Universidad Nacional de San Martín - Facultad de Ingeniería. (2023). Evaluación de los efectos del cambio de uso del suelo y la precipitación en la disponibilidad y oferta hídrica. Revista de Investigación Agrotecnológica y Recursos Hídricos, 15(2), 45–58. http://repositorio.unsm.edu.pe

Vergaray Cusquipoma, J. C. (2020). Análisis multitemporal de la cobertura boscosa y su influencia en la peligrosidad de inundaciones fluviales en la cuenca Ponaza, provincia de Picota–San Martín [Tesis de grado, Universidad Nacional Federico Villarreal]. Repositorio Institucional UNFV. https://hdl.handle.net/20.500.13084/4547

Villón Béjar, M. (2011). Hidrología (2.ª ed.). Ediciones Editorial Tecnológica de Costa Rica.

Los anexos, panel fotográfico y otros documentos están resguardados en la oficina de repositorio digital institucional en la Biblioteca Central de la Universidad Tecnológica de los Andes