

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO

FACULTAD DE CIENCIAS

DEPARTAMENTO ACADÉMICO DE BIOLOGÍA

ESCUELA PROFESIONAL DE BIOLOGÍA



TESIS

**EFICIENCIA DE LOS ÍNDICES DE VEGETACIÓN ESPECTRAL PARA
IDENTIFICAR PROCESOS DE ESCORRENTÍAS DOMINANTES, EN LA
QUEBRADA ARAPATO, DISTRITO DE TAMBURCO, PROVINCIA DE
ABANCAY, REGIÓN DE APURÍMAC.**

Presentado por:

Bach. Jhon Gregory Quispe Almontes

Para optar al título profesional de Biólogo

Asesora:

Dra. Greta Margot Paiva Prado

Co – Asesores:

M.Sc. Jan R. Baiker

M.Sc. Wilfredo Chávez Huamán

**TESIS FINANCIADA POR EL PROGRAMA “YACHAYNINCHIS
WIÑARINANPAQ”**

Cusco – Perú

2021

DEDICATORIA

Dedico este trabajo principalmente a Dios, por permitirme llegar hasta este momento tan importante de mi formación profesional.

A la memoria de papá Goyito, quien confió en mí en todo momento, y aunque ahora lejos, estoy seguro que desde el cielo sigue siendo la fuerza que motiva mi camino.

A mi madrecita Eliza, por ser el pilar más importante y por demostrarme siempre su cariño y apoyo incondicional en todas las etapas de mi vida.

A mis hermanos Pedro, Alex, Melissa, Juan Carlos y Sandra, a quienes admiro y aprendo de ellos cada día.

A Luz quien con su carisma ilumina mi camino.

Jhon Gregory Quispe Almontes

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco, a los docentes de la Escuela Profesional de Biología por sus conocimientos y enseñanzas impartidas a lo largo de mi formación profesional.

Agradecer especialmente a mi asesora Dra. Greta Margot Paiva Prado, por haberme guiado, no solo en la elaboración de este trabajo de tesis, sino a lo largo de mi carrera universitaria, brindándome su apoyo en mi formación profesional y seguir cultivando mis valores.

Al M.Sc. Jan R. Baiker (ACEMAA, Asociación para la Conservación y el Estudio de Montañas Andinas-Amazónicas y Universidad de Zúrich), responsable del proyecto de investigación “*Climate change and human impacts on high mountain wetland ecosystems (bofedales) of the Central Andes – Implications for Ecosystem-based Adaptation in the Ampay National Sanctuary (Apurimac, Peru)*”, financiado por la Agencia Suiza para la Cooperación y el Desarrollo (COSUDE), a través de los Programas PACC Perú (Programa de Adaptación al Cambio Climático; ejecutado por HELVETAS Swiss Intercooperation Perú, y finalizado por fines del 2016) y Bosques Andinos (ejecutado por HELVETAS Swiss Intercooperation y CONDESAN, Consorcio para el Desarrollo Sostenible de la Ecorregión Andina), en cuyo ámbito de estudio se desarrolló la presente investigación recibiendo apoyo profesional y logístico. También agradecerle por la oportunidad de permitirme aprender de su enorme experiencia, haberme brindado su confianza, y su gran amistad.

Al M.Sc. Wilfredo Chávez Huamán, por su inestimable motivación y paciencia desde mis primeros pasos en las aulas universitarias, a quien considero un excelente profesional y gran amigo.

Al Programa de Fortalecimiento Yachayninchis Wiñarinampaq (Para que nuestro conocimiento crezca) de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, por el financiamiento económico de la presente investigación.

Finalmente quiero dedicar a todos/as mis amigos/as, por apoyarme cuando más los necesité, por extender su mano en momentos difíciles y por el cariño brindado cada día, con total atención a Pavel Atauchi, Dina Farfán, Miguel Pedraza, Gaby Choque, Manuel Marca, Lucero Alfaro, Lucero Paredes Brenda Huaranca, Liliana Gallegos, Shirley Durdanet, Cesar Arenas, José Luis Huarco, Cristhian Conza, Yaneth Mamani, Aydee Joachin, Victor Coa, Antony Cachi, Norma Mamani, Liz Calle, Cesar Guerra y al Sr. Juan Pablo Arredondo, de verdad mil gracias, siempre los llevo en mi corazón.

ÍNDICE

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTOS

RESUMENi

INTRODUCCIÓNii

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....iv

JUSTIFICACIÓNv

OBJETIVOSvi

CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO1

1.1. Antecedentes de la investigación1

1.1.1. Antecedentes Internacionales1

1.1.2. Antecedentes Nacionales4

1.2. Bases teóricas.....6

1.2.1. Ciclo hidrológico6

1.2.2. Procesos de escorrentías dominantes (*Dominant Runoff Processes*)8

1.2.3. Ecohidrología20

1.2.4. Teledetección (*Remote Sensing*).....22

1.2.5. Aprendizaje Automático (*Machine Learning*).....33

CAPÍTULO II: ÁREA DE ESTUDIO36

2.1. Ubicación.....36

2.1.1. Ubicación política.....36

2.1.2. Límites36

2.1.3. Ubicación geográfica.....36

2.1.4. Ubicación hidrográfica37

2.1.5. Accesibilidad38

2.2. Características de la zona de estudio.....41

2.2.1. Componente físico41

2.2.2. Componente biológico44

2.3. Principales amenazas en la zona de estudio45

CAPÍTULO III: MATERIALES Y MÉTODOS47

3.1. Materiales47

3.1.1. Material Biológico47

3.1.2. Materiales y equipos de campo47

3.1.3. Materiales y equipos de gabinete.....48

3.2. Metodología	49
3.2.1. Tipo y nivel de la investigación	49
3.2.2. Técnicas de selección de muestra.....	49
3.2.3. Técnicas de recolección de información.....	49
3.2.4. Métodos.....	51
CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIONES.....	71
4.1. Identificación de los tipos de escorrentías dominantes a partir de un procedimiento manual estandarizado en campo.	71
4.1.1. Parámetros evaluados para identificar procesos de escorrentías dominantes	71
4.1.2. Proceso de evaluación para identificar procesos de escorrentías dominantes.....	76
4.2. Analisis de los índices espectrales de vegetación y el perfil espectral de los tipos de escorrentías dominantes.	80
4.2.1. Evaluación de índices espectrales de vegetación	80
4.2.2. Evaluación de bandas espectrales.....	89
4.3. Evaluación de algoritmos inteligentes de clasificación, para el reconocimiento automático de los tipos de escorrentías dominantes.	92
4.3.2. Entrenamiento y evaluación de algoritmos	92
4.4. Mapeo de los tipos de escorrentías dominantes para toda la zona de estudio.	95
4.4.1. Algoritmo de Redes Neuronales (NNT)	95
4.4.2. Algoritmo de Bosque Aleatorio (RF).....	96
4.4.3. Algoritmo de Maquinas de Vectores de Soporte (SVM)	97
CONCLUSIONES	100
RECOMENDACIONES	101
BIBLIOGRAFÍA	102
ANEXOS.....	108

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Diagrama del ciclo hidrológico.	6
Figura 2: Procesos de escorrentías dominantes sobre una ladera.	9
Figura 3: Tipos de escorrentías dominantes.	11
Figura 4: Formación de escorrentía sobre un perfil de suelo.	13
Figura 5: Esquema de decisión para praderas con pendientes mayores a 3%.	18
Figura 6: Esquema generalizado de decisión para procesos de escorrentías dominantes.	19
Figura 7: Relación entre la dirección del flujo de agua y la vegetación.	21
Figura 8: Componentes de un sistema de teledetección.	24
Figura 9: Espectro electromagnético.	25
Figura 10: Firma espectral característica de diferentes elementos terrestres.	26
Figura 11: Reflectancia en las bandas del rojo, azul e infrarrojo cercano.	31
Figura 12: Esquema del algoritmo: Redes Neuronales Artificiales.	34
Figura 13: Esquema del algoritmo: Random Forest	34
Figura 14: Esquema del modelo: Máquinas de Vectores de Soporte	35
Figura 15: Ubicación política de la zona de estudio.	39
Figura 16: Accesibilidad a la zona de estudio.	40
Figura 17: Climatodiagrama de la zona de estudio.	43
Figura 18: Flujograma del proceso de investigación.	50
Figura 19: Parcelas botánicas para colecta y evaluación de la vegetación.	52
Figura 20: Parcela para toma y evaluación de muestras de suelos.	53
Figura 21: Sección transversal horizontal para cuantificar macroporosidad	54
Figura 22: Triángulo textural KA4 y matriz de permeabilidad.	57
Figura 23: Infiltrómetro de doble anillo y proceso de infiltración.	58
Figura 24: Simulador de escorrentía.	61
Figura 25: Imagen satelital Sentinel 2B (2019/07/12).	63
Figura 26: Cuadrícula de 10 m x 10 m y puntos evaluados en campo.	64
Figura 27: Ubicación de puntos de evaluación en campo.	72
Figura 28: Influencia de la vegetación sobre la infiltración.	75
Figura 29: Evaluación de la permeabilidad de la matriz del suelo.	75
Figura 30: Influencia de la porosidad sobre la lámina de infiltración del suelo.	76
Figura 31: Perfil de suelo del punto 1.	78
Figura 32: Porcentaje de procesos de escorrentías dominantes evaluados en campo.	80
Figura 33: Índices espectrales de vegetación evaluados.	81
Figura 34: Evaluación del NDVI	83
Figura 35: Evaluación del BSI	83
Figura 36: Evaluación del MAVI	84
Figura 37: Distribución de la variable respuesta (DRP)	85
Figura 38: Curva GAM del NDVI y MAVI	89
Figura 39: Perfil espectral de los tipos de escorrentías	91
Figura 40: Histograma de densidades del perfil espectral	91
Figura 41: Modelo DRP – NNT	96
Figura 42: Modelo DRP – RF	96
Figura 43: Modelo DRP – SVM.	97

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Clasificación de lluvias según su intensidad	8
Tabla 2: Tipos de flujos considerados en el esquema de decisión.....	11
Tabla 3: Lista de clasificación hidrológica de procesos de escorrentías dominantes.....	16
Tabla 4: Procesos de escorrentías dominantes automático.	18
Tabla 5: Resolución espacial de las bandas del satélite Sentinel 2B.....	27
Tabla 6: Ubicación política del área de estudio.....	36
Tabla 7: Límites del área de estudio.	36
Tabla 8: Información del área de estudio.....	37
Tabla 9: Ubicación hidrográfica del área de estudio.	37
Tabla 10: Accesibilidad al área de estudio.....	38
Tabla 11: Datos meteorológicos de la estación Granja San Antonio.....	43
Tabla 12: Flora dentro de la zona de estudio.	44
Tabla 13: Fauna de la zona de estudio.	45
Tabla 14: Clases de repelencia al agua.....	55
Tabla 15: Clasificación de la densidad aparente y grado de compactación del suelo.....	57
Tabla 16: Tipo de rutas preferenciales para el flujo lateral.....	61
Tabla 17: Imagen satelital seleccionada para la investigación.....	63
Tabla 18: Bandas utilizadas para el NDVI, BSI y MAVI.....	65
Tabla 19: Evaluación de la vegetación.	73
Tabla 20: Porcentaje de procesos de escorrentía dominantes evaluados en campo.	79
Tabla 21: Valores de reflectancia de los índices espectrales de vegetación.	82
Tabla 22: GAM1 (DRP~NDVI, MAVI, BSI).....	85
Tabla 23: GAM2 (DRP~NDVI, MAVI)	86
Tabla 24: GAM3 (DRP~MAVI)	86
Tabla 25: RMSE y AIC de los Modelos	87
Tabla 26: Valores de reflectancia extraídos de una imagen satelital Sentinel 2B	89
Tabla 27: Promedio de los valores de reflectancia asociado a los DRP	90
Tabla 28: Validación cruzada:.....	92
Tabla 29: Valores evaluados y predichos por los algoritmos	92
Tabla 30: Matriz de confusión del algoritmo de redes neuronales.....	92
Tabla 31: Evaluación de desempeño del algoritmo de redes neuronales	93
Tabla 32: Matriz de confusión del algoritmo de random forest	93
Tabla 33: Evaluación de desempeño del algoritmo de random forest	93
Tabla 34: Matriz de confusión del algoritmo de Máquinas de Vectores de Soporte	94
Tabla 35: Evaluación de desempeño del algoritmo de Maquinas de Vectores de Soporte.....	94
Tabla 36: Evaluación del desempeño de algoritmos	94
Tabla 37: DRP identificados usando modelos de Aprendizaje Automático	95

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1: Matriz de consistencia de la investigación.....	108
Anexo 2: Operacionalización de variables.....	109
Anexo 3: Escala de Munsell 10YR.....	110
Anexo 4: Tamaño de partículas y clases texturales.....	111
Anexo 5: Ubicación de los puntos de evaluación y procedimientos realizados.....	112
Anexo 6: Formato para la evaluación de vegetación.	113
Anexo 7: Formato para la evaluación de suelos.	114
Anexo 8: Formato para la evaluación de infiltración.	115
Anexo 9: Formato para la evaluación de escorrentía	116
Anexo 10: Código en el lenguaje de programación en R.....	117
Anexo 11: Perfiles de suelo.....	123
Anexo 12: Mapa de grilla del satélite Sentinel 2.....	152
Anexo 13: Panel fotográfico	153

SIGLAS Y ABREVIATURAS

AIC (Criterio de información Akaike / Akaike information criterion)

ANA (Autoridad Nacional del Agua)

BSI (Índice de Suelo Desnudo/ Bare Soil Index)

CAN (Comunidad Andina)

DP (Percolación Profunda / Deep Percolation)

DRP (Procesos de Escorrentías Dominantes/Dominant Runoff Processes)

GAM (Modelo Aditivo Generalizado / Generalized Additive Model)

GIS (Sistemas de Información Geográfica / Geographic Information System)

GORE Apurímac (Gobierno Regional de Apurímac)

HOF (Flujo Terrestre Hortoniano / Hortonian Overland Flow)

INGEMMET (Instituto Geológico Minero y Metalúrgico del Perú)

MAVI (Índice de Vegetación Ajustado a la Humedad / Moisture Adjusted Vegetation Index)

MINAM (Ministerio del Ambiente)

NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada / Normalized Difference Vegetation Index)

NNET (Redes Neuronales / Neuronal Network)

RGB (Rojo, Verde, Azul / Red, Green, Blue)

RF (Bosque Aleatorio / Random Forest)

RMSE (Raíz del Error Cuadrático Medio / Root Mean Square Error)

SENAMHI (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología)

SERNANP (Servicio Nacional de Áreas Naturales Protegidas/)

SOF (Flujo Terrestre Saturado / Saturation Overland Flow)

SSF (Flujo Subsuperficial / Subsurface Flow)

SVM (Maquinas de Vector Soporte / Support Vector Machines)

USDA (Departamento de Agricultura de los Estados Unidos / United States Department of Agriculture)

WMO (Organización Meteorológica Mundial / World Meteorological Organization)

ZA SNA (Zona de Amortiguamiento del Santuario Nacional del Ampay)

ZEE Apurímac (Zonificación Económica Ecológica de la región Apurímac)

RESUMEN

La identificación de escorrentías dominantes después de precipitaciones intensas, permite caracterizar el paisaje, siendo útil en la toma de decisiones para la gestión del agua y suelo. La presente investigación determinó la eficiencia de tres índices espectrales de vegetación, derivados de una imagen satelital Sentinel 2B, para identificar Procesos de Escorrentías Dominantes (DRP); el método para identificar los DRP fue mediante un procedimiento manual estandarizado evaluado *in situ*, teledetección y el uso de algoritmos inteligentes (*machine learning*). Los datos medidos en campo, fueron comparados con valores de reflectancia del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), Índice de Suelo Desnudo (BSI) e Índice de Vegetación Ajustado a la Humedad (MAVI). Los resultados obtenidos muestran que con un nivel de significancia ($p > 0.05$), el Modelo Aditivo Generalizado GAM2 aplicado sobre el NDVI y el MAVI permiten predecir a un 67% los tipos de escorrentías identificados *in situ*, cuyo valor de AIC del modelo es igual a 50.4, y un RMSE de 0.36. En un perfil espectral de DRP, la banda del infrarrojo cercano, muestra diferentes valores de reflectancia para distinguir los tipos de escorrentías. Para el mapeo de los DRP de toda la zona de estudio, se entrenó y evaluó algoritmos inteligentes, verificándose que el algoritmo de Bosque Aleatorio (RF) presenta una exactitud del 67%, para identificar el Flujo Terrestre Hortoniano Retardado ($\text{HOF2} = 16.6\%$), Flujo Terrestre Saturado Retardado ($\text{SOF2} = 3.2\%$), Flujo Subsuperficial Retardado ($\text{SSF2} = 75.7\%$), y Percolación Profunda ($\text{DP} = 4.5\%$). Por lo tanto, la conclusión de la investigación, demuestra que los índices evaluados a partir de las bandas espectrales, obtenidos de una imagen del satélite Sentinel 2B, son eficientes en un 67%, para generar información hidrológica básica de DRP a partir de la aplicación de algoritmos inteligentes.

Palabras clave: Procesos de escorrentías dominantes, Índices espectrales de vegetación, algoritmos inteligentes.

INTRODUCCIÓN

El Pajonal de puna húmedo, es un ecosistema de la región andina que se caracteriza por presentar un clima per húmedo y frío, que alberga una vegetación herbácea, constituida principalmente por céspedes dominados por gramíneas de porte bajo y pajonales que crecen en macollos, en algunos casos asociados a vegetación arbustiva dispersa, intercaladas con vegetación saxícola en los afloramientos rocosos, en muchos casos asociados a los bofedales cuya vegetación herbácea de tipo hidrófila, es densa, compacta siempre verde, de porte almohadillado o en cojín (MINAM, 2019); ambos ecosistemas tienen la capacidad de brindar servicios ecosistémicos en la regulación y oferta hídrica claves para la sociedad (CAN, 2009), puesto que la vegetación juega un papel muy importante en la formación de flujos hídricos, debido que al caer la precipitación, esta va a ser interceptada por la cobertura vegetal (García et al., 2014), generando escorrentías dominantes en el suelo.

La importancia de identificar los tipos de procesos de escorrentías dominantes (*Dominant RunOff Processes*) superficiales, subterráneos o por percolación, recae en la necesidad de tener información hidrológica básica, útil para caracterizar ecohidrológicamente el espacio, predecir inundaciones, controlar procesos de erosión, identificar el transporte de contaminantes, y evaluar los impactos generados por el cambio de uso de suelos (Fagbohun et al., 2017), por tal razón resulta importante disponer de medios que ayuden a extrapolar esas mediciones en el espacio y en el tiempo, particularmente en cuencas donde los datos no están disponibles. Es importante resaltar que la información acerca de estos procesos es escasa en ecosistemas altoandinos, esto debido a la poca investigación en campo y falta de monitoreo hidrológico *in situ*.

En la actualidad existen métodos de teledetección (*Remote Sensing*), que permite obtener información a distancia de los objetos sobre la tierra, una aplicabilidad en particular, son los índices espectrales de vegetación, que son herramientas básicas calculados a partir de los valores de reflectancia a diferentes longitudes de onda, donde interaccionan las ondas electromagnéticas y la vegetación fotosintéticamente activa (Otto et al., 2011). La información generada evalúa el estado y cantidad de la vegetación (Bannari et al., 1995), indicador que serviría para entender la formación de flujos dominantes después de eventos de precipitaciones para nuestra zona de estudio.

Por otro lado, los algoritmos de Aprendizaje Automático (*Machine Learning*), son una rama de la inteligencia artificial que busca que los ordenadores sean capaces de aprender e inducir conocimiento a partir de los datos, por lo que, a partir del entrenamiento de datos de tipos de escorrentías dominantes dentro de un modelo de Redes Neuronales (*Neuronal*

Network), Bosque Aleatorio (*Random Forest*) y Maquinas de Vector Soporte (*Support Vector Machines*), permitirá realizar la caracterización ecohidrológica del área de estudio.

La presente investigación, se enfoca en el uso de teledetección y algoritmos inteligentes, apoyado en Sistemas de Información Geográfica, para identificar Procesos de Escorrentías Dominantes, a partir de valores de reflectancia de las bandas espectrales de vegetación e información recopilada en campo, obteniendo información cartográfica supervisada y relevante para apoyar en la toma de decisiones como parte del manejo de agua y suelo en el valle de la quebrada Arapato, de la Zona de Amortiguamiento del Santuario Nacional del Ampay, distrito de Tamburco, provincia de Abancay, Región de Apurímac.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En el Perú, en los últimos años la escasa planificación de territorio tiene repercusiones sobre los ecosistemas altoandinos, donde se presentan amenazas de origen antrópico como los incendios provocados en pastizales de manera negligente y el sobrepastoreo intensivo, lo que acelera procesos de erosión y desertificación, que afectan la formación de los flujos de escorrentías e infiltraciones naturales. Estas amenazas asociados a eventos extremos de excesivas precipitaciones cuya relación con la escorrentía superficial y subterránea, influyen sobre procesos de degradación de suelos, erosión hídrica y pérdida de cobertura vegetal, ocasionan además peligros por movimientos en masas, afectando a la población próxima y a sus sistemas productivos. En la puna húmeda de la zona de Amortiguamiento del Santuario Nacional del Ampay, considerada cabecera de cuenca cuya topografía es irregular, la información ecohidrológica es escasa, debido a la poca investigación y monitoreo hidrológico en campo, cuyo aporte, permitirá apoyar en la toma de decisiones mejorando los planes actuales de planificación y gestión por parte de los actores involucrados respecto al uso del agua y suelo. Así mismo, la necesidad de desarrollar la presente investigación es compatible con los lineamientos y el Plan Nacional de Acción Ambiental Perú 2011-2021, Estrategia Regional Frente al Cambio Climático y Plan de Desarrollo Concertado de la región Apurímac y como línea de acción transversal de investigación del Plan Maestro del Santuario Nacional de Ampay 2015-2019.

El presente trabajo de investigación, aplica algoritmos inteligentes (*Machine Learning*), sobre las bandas de índices espectrales de vegetación, obtenidas por teledetección de una imagen satelital Sentinel 2B, para identificar automáticamente procesos de escorrentías dominantes en un ecosistema altoandino.

Después de analizar la situación problemática, la presente investigación pretende responder el siguiente problema general

¿La información espectral proveniente de los Índices espectrales de vegetación son eficientes para la identificación de procesos de escorrentías dominantes a partir de la aplicación de algoritmos inteligentes?

JUSTIFICACIÓN

Justificación teórica

El valor ecológico, económico, social y cultural es muy alto en los ecosistemas altoandinos; Sin embargo, son considerados ecosistemas frágiles frente a escenarios de cambio climático, siendo necesario entender y analizar características eco hidrológicas basadas en paisajes con comportamiento hidrológico similar, la información obtenida podrá ser útil para entender la relación entre la vegetación y la predicción de escorrentías dominantes en cuencas altoandinas.

Justificación práctica

En el valle de la quebrada Arapato, ubicado en la zona de Amortiguamiento del Santuario Nacional del Ampay, no se tienen objetivos conjuntos sobre gestión del uso de agua y suelos por parte de las autoridades, permitiendo prácticas no enfocadas en su conservación (sobrepastoreo, expansión agrícola). El presente estudio es relevante porque busca generar información hidrológica básica, coherente y económica que podría ser útil en la planificación y gestión del uso de agua y suelo, enfocándose en su conservación.

Justificación metodológica

El esquema de decisión planteado por Scherrer y Naef (2003), para identificar procesos de escorrentías dominantes, no ha sido utilizado en el Perú, de esta manera los resultados servirán de referencia para determinar la eficacia de este método bajo las condiciones dadas en este estudio. Por otro lado, apoyado en el uso de la teledetección y algoritmos inteligentes, se busca evaluar y comparar la eficiencia de información obtenida a partir de las bandas espectrales de los índices de vegetación, que serán entrenados y validados con data obtenida por un procedimiento manual estandarizado, brindando los insumos necesarios para su replicación.

OBJETIVOS

Objetivo general

Evaluar la eficiencia de los índices espectrales de vegetación para la identificación de procesos de escorrentías dominantes, en la quebrada Arapato, distrito de Tamburco, provincia de Abancay, Región de Apurímac.

Objetivos específicos

- a) Identificar los tipos de escorrentías dominantes a partir de un procedimiento manual estandarizado de campo.
- b) Analizar los índices espectrales de vegetación y el perfil espectral de los tipos de escorrentías dominantes.
- c) Evaluar algoritmos inteligentes de clasificación, para el reconocimiento automático de los tipos de escorrentías dominantes.
- d) Mapear los tipos de escorrentías dominantes para toda la zona de estudio.

CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO

1.1. Antecedentes de la investigación

1.1.1. Antecedentes Internacionales

Ran et al., (2020) en su trabajo de investigación “*Exploring the Dominant Runoff Processes in Two Typical Basins of the Yellow River, China*” (Exploración de los procesos de escorrentía dominantes en dos cuencas típicas del río Amarillo, China). El estudio se realizó en la cuenca del río Jialu y la subcuenca Jingle en China, cubriendo áreas 1134 km² 2799 km² respectivamente. El objetivo de la investigación fue analizar los cambios en los componentes de la escorrentía en las zonas de estudio desde 1980 al 2013.

La metodología utilizada consistió en la segmentación de la escorrentía apoyado en el esquema de decisión y el uso de herramientas del sistema de información geográfica (SIG).

La investigación concluyó que la proporción de componentes de flujo terrestre para 2000-2013 en las dos cuencas mostró una tendencia decreciente en un 8.3% y un 7.1%, respectivamente, mientras que los componentes de flujo interflujo y escorrentía subterránea aumentaron. Además, HOF fue el DRP en la cuenca del río Jialu y la subcuenca Jingle de 2000 a 2013. El área de los procesos de escorrentía rápida (HOF, SOF1 y SSF1) en la cuenca del río Jialu y la subcuenca Jingle representó 89 % y 78% de toda la cuenca, respectivamente. En contraste, los procesos de escorrentía lenta (SOF2, SSF2 y DP) representaron el 11% y el 22% de toda la cuenca, respectivamente. Los resultados de este estudio proporcionan información útil para comprender los cambios en el uso de la tierra y formular prácticas de gestión para reducir las inundaciones en la zona de estudio.

Valencia y Tobón (2017) en su trabajo de investigación “*Influencia de la vegetación en el funcionamiento hidrológico de cuencas de humedales de alta montaña tropical*”. El estudio se realizó en dos cuencas de páramo en Colombia. El objetivo de la investigación fue entender el efecto de la vegetación y el clima sobre los flujos hidrológicos en humedales del norte de los Andes.

La metodología utilizada consistió estimar la capacidad de interceptación de lluvia por las coberturas vegetales dominantes (Frailejonal, Chuscal y Pajonal) mediante experimentos de precipitación inducida; asimismo, se calculó la evapotranspiración de referencia (ET_o) con la ecuación de Penman-Monteith.

La investigación concluyó que las coberturas frailejonal y chuscal presentaron mayor capacidad de interceptación con respecto a pajonal y existe conformidad en cuanto a que la interceptación depende tanto de las características de la precipitación como de los doseles

de la vegetación (forma de las hojas, el ángulo y la inclinación de las ramas, el índice de área foliar).

Fagbohun et al (2017) en su trabajo de investigación “*GIS-Based Sub Basin Scale Identification of Dominant Runoff Processes for Soil and Water Management in Anambra Area of Nigeria*” (Identificación de procesos de escorrentías dominantes (DRP) basado en Sistemas de Información Geográfica (SIG) para la gestión de agua y suelo en una sub cuenca del área de Anambra – Nigeria). El estudio se realizó en la cuenca de Anambra que cubre un área de unos 30,000 km². El objetivo de la investigación fue identificar procesos de escorrentías dominantes para contribuir a la mitigación del peligro por inundación asociado a flujos superficiales, identificar zonas de recarga de agua subterránea, y apoyar en la implementación de medidas de gestión contra la erosión del suelo.

La metodología utilizada se basó en el uso de geo estadística básica, a partir de un enfoque automatizado que combina información de permeabilidad del sustrato, pendiente y uso de suelos, apoyado en plataformas de Sistemas de Información Geográfica (Müller et al., 2009).

La investigación concluyó que el flujo terrestre de Horton (HOF) tiene la cobertura más alta de 1508,3 km² (33,5%) seguido de la filtración profunda (DP) con una cobertura de 1455,3 km² (32,3%) cuya recarga contribuye al agua subterránea, el flujo subsuperficial (SSF) es el tercer proceso de escorrentía dominante que cubre 920.6 km² (20.4%) mientras que el flujo superficial saturado (SOF) cubre el área menor de 618.4 km² (13.7%) del área de estudio.

Antonetti et al (2016) en su trabajo de investigación “*Mapping dominant runoff processes: an evaluation of different approaches using similarity measures and synthetic runoff simulations*” (Mapeo de procesos de escorrentías dominantes: una evaluación de diferentes enfoques que utilizan medidas de similitud y simulación de escorrentía sintética). El estudio se realizó en dos pequeñas cuencas en una meseta de Suiza. El objetivo de la investigación fue mapear procesos de escorrentías dominantes para clasificar el paisaje a partir de diferentes enfoques.

La metodología utilizada se basa en el uso de un enfoque manual, el cual requiere un exhaustivo trabajo de campo (Scherrer y Naef, 2003) y tres enfoques automáticos basados en modelos (Gharari et al., 2011; Muller et al., 2009; Schmocker et al., 2007) para mapear procesos de escorrentías dominantes.

La investigación concluye que, para la clasificación del paisaje, es determinante el concepto de procesos de escorrentías dominantes (DRP). Sin embargo, los diversos enfoques de mapeo DRP difieren con respecto al tiempo, espacio y los datos requeridos para cartografía. Los enfoques manuales son fiables y robustos, pero lentos; y los enfoques automáticos basados en el uso de sistemas de información geográfica presentan diferencias en inexactitud y resolución. La aproximación basada en el uso de topografía, uso de suelo, geología, mapas de suelos, mapas de drenaje y mapas de vegetación planteada por (Schmocker et al., 2007), fue la más realista respecto al mapa generado en campo.

Muller et al (2009) en su trabajo de investigación “*Identification and regionalization of dominant runoff processes – a GIS based and a statistical approach*” (Identificación y regionalización de procesos de escorrentías dominantes – una aproximación estadística basada en Sistemas de Información Geográfica). El estudio se realizó en Renania-Palatinado (Alemania). El objetivo de la investigación fue identificar procesos de escorrentías dominantes respecto a la regionalización.

La metodología utilizada desarrolla dos enfoques: a) enfoque geo estadístico, que combina la permeabilidad del sustrato, uso de suelo y pendiente de la cuenca y un enfoque estadístico, que hace uso de un análisis discriminante de las características fisiográficas de la cuenca.

Se concluye que, el enfoque geo estadístico se aplica muy bien para cuencas a micro escala con un nivel de precisión aceptable (79%) respecto al enfoque estadístico (51%), de la misma manera a un nivel de meso escala el enfoque geo estadístico es mejor predictor (81%), frente al enfoque estadístico (68%), por lo tanto, el enfoque geo estadístico es mejor en cuanto a la entrada de datos y el tiempo de cálculo que se requiere. Sin embargo, es necesario mejorar los recursos disponibles como el modelo de elevación digital y los mapas geológicos para un mejor mapeo de los procesos de escorrentías dominantes.

Schmocker et al (2007) en su trabajo de investigación “*Identifying runoff processes on the plot and catchment scale*” (Identificación de procesos de escorrentías en una parcela de una cuenca). El estudio se realizó en la cuenca de Ror (2,1 km²) y la cuenca de Isert (1,7 km²) que se encuentran a 30 km al noreste de Zúrich (Suiza). El objetivo de la investigación fue: (1) desarrollar una metodología que permita la delineación de procesos de escorrentía dominantes en el campo con Sistemas de Información Geográfica y (2) ilustrar cómo un mapa de este tipo puede ser utilizado en el modelado de la lluvia y la escorrentía.

La metodología utilizada consistió en evaluar las propiedades del terreno de 44 perfiles edafológicos en dos captaciones suizas, usando experimentos para determinar procesos de escorrentías dominantes (DRP) siguiendo el esquema de decisión planteado por Scherrer y Naef (2003). Al mismo tiempo, desarrollaron un método simplificado que posibilita identificar DRP sólo en base a mapas del terreno, la topografía y la geología.

Se concluyó que el nuevo esquema generalizado para identificar procesos de escorrentías dominantes, permitirá generar mapas que apoyaría en cuantificar la escorrentía y definir parámetros de infiltración después de eventos de precipitaciones. Además, solo requiere de información de mapas detallados del suelo, mapas de geología, vegetación y topografía complementados con el uso de Sistemas de Información Geográfica.

1.1.2. Antecedentes Nacionales

Aponte y Ospina (2019) en su trabajo de investigación “*Evaluando el desempeño de índices espectrales para identificar humedales altoandinos*”. El estudio se realizó en la parte Occidental de la cordillera Central en Perú, a una altitud promedio de 4185 m.. el área estimada es de 1300 km². El objetivo de la investigación fue evaluar el desempeño de seis índices espectrales para identificar humedales altoandinos en períodos de escasa precipitación.

La metodología utilizada consistió en agrupar los píxeles de cada banda espectral para encontrar el rango de valores de los píxeles asociados a humedales altoandinos, cada grupo de píxeles fue contrastado sobre una imagen de mayor resolución espacial, para asociarlo con la identificación de los humedales altoandinos y otras coberturas, se aplicó el método estadístico Cross Validation para evaluar el desempeño de datos similares.

Los resultados evidencian que el índice de TCG, cuyo valor de EMC es 0,00131; el valor de la media y desviación estándar de la estimación de la precisión fue 0,141 y 0,004; seguido, por el SAVI; obteniendo el valor de EMC de 0,00317 y el valor de la media y desviación estándar de la estimación de la precisión fue 0,238 y 0,009 respectivamente. El índice que presenta menor desempeño fue es el NDVI.

Garcia y Otto (2015) en su trabajo de investigación “*Caracterización ecohidrológica de humedales altoandinos usando imágenes de satélite multitemporal en la cabecera de cuenca del río Santa, Ancash en Perú*”. El estudio se realizó en la cuenca alta del rio Santa (Ancash), cubriendo un área de 292 km² y a una altitud de 4285 m. el objetivo de la

investigación fue caracterizar eco hidrológicamente el paisaje validando la metodología planteada por Otto et al (2011).

La metodología utilizada consistió en identificar y delimitar espacialmente los humedales altoandinos definiendo umbrales, se utilizó imágenes de satélite Landsat 5, definiendo primero los tipos a partir del Índice de la Diferencia Normalizada de la Vegetación (NDVI por sus siglas en ingles), posteriormente los subtipos fueron identificados mediante el Índice Infrarrojo de Diferencia Normalizada (NDII).

La investigación concluye que la extensión espacial con la identificación de tipos y subtipos de los humedales altoandinos es altamente dependiente de la precipitación. El uso de índices espectrales de vegetación extraída de sensores remotos, basadas en propiedades fotosintéticamente activas de la vegetación, resulta ser un buen indicador de la presencia de flujos de agua en una cuenca.

Otto et al (2011) en su trabajo de investigación “*Hydrological differentiation and spatial distribution of high altitude wetlands in a semi-arid Andean region derived from satellite data*” (Diferenciación hidrológica y distribución espacial de humedales de gran altitud en una región andina semiárida derivada de datos satelitales), a través de teledetección determina humedades perennes y temporales distinguiendo cambios estacionales de la vegetación fotosintéticamente activa (*Photosynthetic Active Vegetation* – PAV, por sus siglas en ingles) que indican la disponibilidad perenne o temporal de agua durante el año.

La metodología utilizada fue una clasificación multitemporal, utilizando los datos del Índice Normalizado de Vegetación Diferenciada (NDVI) y el Índice Normalizado del Infrarrojo Diferenciado (NDII) derivados de dos escenas Landsat ETM + al final del invierno austral (septiembre de 2000) y al final del verano austral (mayo de 2001).

El resultado del mapeo indica una alta abundancia inesperada de humedales de gran altitud que cubre aproximadamente 800 km² de la región de Arequipa (6%), se sospecha que influyen en la hidrología a través de la retención de agua y el crecimiento de la vegetación, lo que altera la velocidad del flujo de la corriente.

1.2. Bases teóricas

1.2.1. Ciclo hidrológico

1.2.1.1. Proceso del ciclo hidrológico

El ciclo hidrológico se define como la secuencia de fenómenos o cambios que experimenta el agua en la naturaleza, el cual es irregular y no tiene principio ni fin (Villón, 2011). En términos generales, el agua pasa de la superficie terrestre, en la fase de vapor, a la atmósfera y regresa en sus fases líquida y sólida (Elosegi y Sabater, 2009)

El ciclo del agua es muy importante para el normal desarrollo de los diferentes procesos naturales en la superficie terrestre. Sin embargo, se ha visto evidenciado en una crisis de agua para miles de millones de personas y muchos ecosistemas en todo el mundo, esto influenciado por el uso irracional del agua por el hombre, el cambio climático y la conversión del uso del suelo (Abbott et al., 2019).

Los principales componentes del ciclo hidrológico son (Figura 1): la precipitación, evaporación, transpiración, infiltración, percolación, escorrentía superficial, flujo sub superficial y el flujo subterráneo (Villón, 2011).

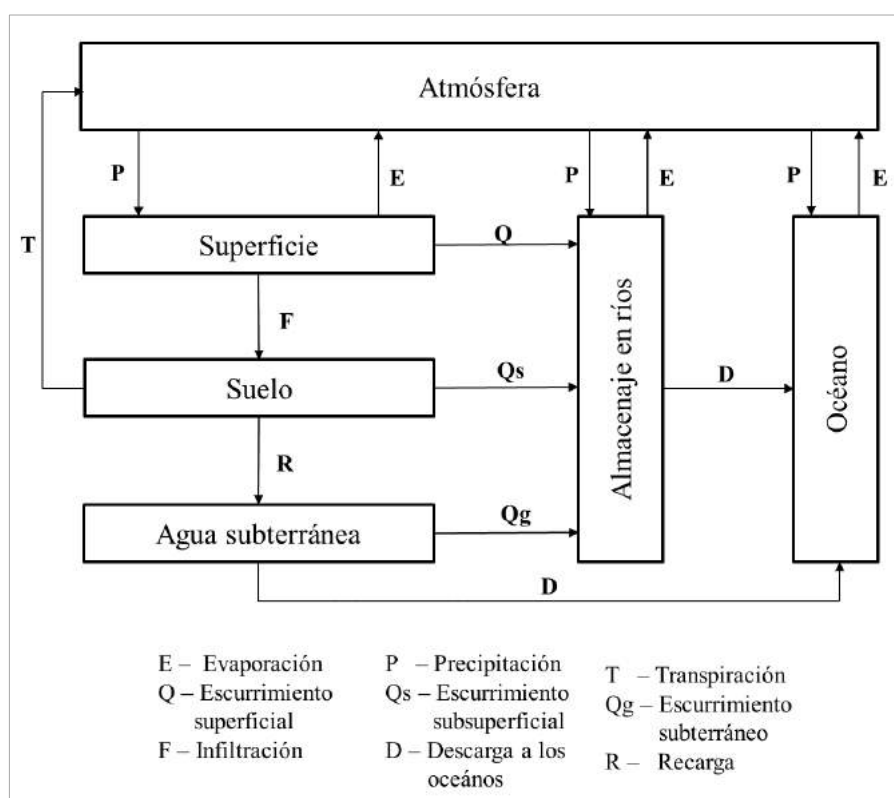


Figura 1: Diagrama del ciclo hidrológico.

Fuente: Villón (2011: 17).

La precipitación puede ocurrir en la fase líquida (lluvia) o en la fase sólida (nieve o granizo), incluye el agua que pasa de la atmósfera a la superficie terrestre por condensación del vapor de agua (rocío) o por congelación del vapor (helada) y por intercepción de las gotas de agua de las nieblas (Elosegi y Sabater, 2009), una vez en contacto la precipitación con la vegetación o con el suelo de manera directa, se generan procesos de escorrentía, quiere decir que parte de la precipitación fluye por la superficie del terreno hacia un curso de agua (escorrentía de superficie) o en el interior del suelo y también se va a generar procesos de infiltración el cual evidencia flujos de agua que penetra en un medio poroso a través de la superficie del suelo” (WMO, 2012).

a. Precipitación

La precipitación, es toda forma de humedad, que está originada en las nubes, y es la principal entrada de agua a la superficie terrestre. Se manifiesta bajo la forma de llovizna, lluvia, escarcha, nieve y granizadas. “Una nube está compuesta de pequeñas gotas cuyo diámetro aproximado es de 0.02 mm, separadas 1 mm una de otra, con una masa de 0.5 a 1 gr/m³, que a partir de su engrosamiento por fusión y condensación, las gotas aumentan de diámetro de 0.5 a 2 mm generando la precipitación” (Villón, 2011: 69).

Para la formación de la precipitación, es necesario la elevación de una masa de agua a la atmosfera, la cual se enfría y parte de su humedad se condensa. La clasificación de la precipitación según Villón (2011), va a depender del factor que provoca dicha elevación, siendo:

- Precipitación de convección: producto de la abundante evaporación a partir de la superficie del agua, la cual va a formar grandes masas de vapor de agua que, por estar calientes, se elevan sufriendo un enfriamiento hasta llegar a grandes alturas, donde encuentran condiciones que provocan su condensación y la precipitación.
- Precipitación orográfica: en este tipo de precipitación el factor de elevación es el viento que empuja el vapor de agua que se forma sobre la superficie de agua, esta sigue por las laderas de las montañas hasta encontrar las condiciones para la condensación y posterior precipitación.
- Precipitación ciclónica: debido al encuentro de dos masas de aire, con diferentes temperaturas y humedad, donde las nubes más calientes van ser impulsadas a las partes más altas, produciéndose la condensación y precipitación.

El Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) en el Perú, desarrolló indicadores adaptados a las características climáticas del Perú, clasificando las lluvias según su intensidad (Tabla 1).

Tabla 1: Clasificación de lluvias según su intensidad

Intensidad (mm/día)	Clasificación
$1.5 \leq I < 3.0$	Ligera
$3.0 \leq I < 9.0$	Moderada
$9.0 \leq I < 36.0$	Fuerte
$36.0 \leq I < 180.0$	Intensa
$I > 180.0$	Extraordinaria

Fuente: (SENAMHI, 2002).

b. Escorrentía

La escorrentía, se refiere al agua que proviene de la precipitación, que circula sobre o bajo la superficie terrestre, y que finalmente va a llegar a una corriente para ser drenada hasta la salida de una cuenca (Elosegi y Sabater, 2009).

La escorrentía superficial, depende fundamentalmente de factores meteorológicos y fisiográficos. Al ser un proceso muy complejo, dentro de los factores meteorológicos se evalúan elementos de la precipitación como la forma, tipo, intensidad, duración, distribución, dirección y velocidad. Por otro lado, los factores fisiográficos requieren un análisis completo de la cuenca, evaluando su superficie, forma, elevación, pendiente, estado de humedad, tipo y uso de suelo (Villón, 2011).

1.2.2. Procesos de escorrentías dominantes (*Dominant Runoff Processes*)

1.2.2.1. Teorías acerca de la formación de flujos

- a. **Concepto de área parcial:** “Horton (1933), menciona que los procesos de escorrentías ocurren cuando la intensidad de precipitación excede la tasa de infiltración. Basado en este proceso Betson (1964) desarrolló el concepto del área parcial, el cual consiste en la formación de escorrentía en un área de la cuenca a partir del exceso de infiltración” (Schmocker, 2004: 5).
- b. **Concepto variable del área de la fuente:** “Dunne y Black (1970), muestran que la intensidad de precipitación con frecuencia no excede la capacidad de infiltración y que la escorrentía producida después de una tormenta es principalmente sobre áreas

saturadas, que a su vez pueden presentar baja capacidad de almacenamiento o son superficies ubicadas en la base de las laderas y por lo tanto la saturación es causada por flujos laterales” (Schmocker, 2004: 5).

- c. **Concepto de área en ejecución variable y área contribuyente:** “Ambroise (2004), menciona que el área en ejecución variable genera procesos hidrológicos bajo condiciones dadas (estructura, topografía, características de la precipitación), mientras que el área contribuyente solo se enfoca en ese canal por donde sucede la escorrentía” (Schmocker, 2004: 5).

En la figura 2, se muestra que las formaciones de estas escorrentías en un suelo natural después de precipitaciones intensas son muy complejas, por la presencia de flujos terrestres Hortonianos (a), flujos terrestres saturados (b), flujos en la matriz (c), flujos por macroporos (d), flujos por canales (e), flujos en capas altamente permeables (f), flujos de retorno (g), percolación profunda (h) y flujos de agua subterránea (i), que no están muy entendidas en su hidrología (Schmocker, 2004).

La identificación de Procesos de Escorrentías Dominantes, es importante para planificar medidas de conservación del agua, predecir inundaciones, controlar la erosión, identificar transporte de contaminantes, evaluar los impactos en los cambios de uso de suelo, identificar zonas de recarga de aguas subterráneas y monitorear la sedimentación en las áreas aguas abajo (Blume et al., 2008; Fagbohun et al., 2017).

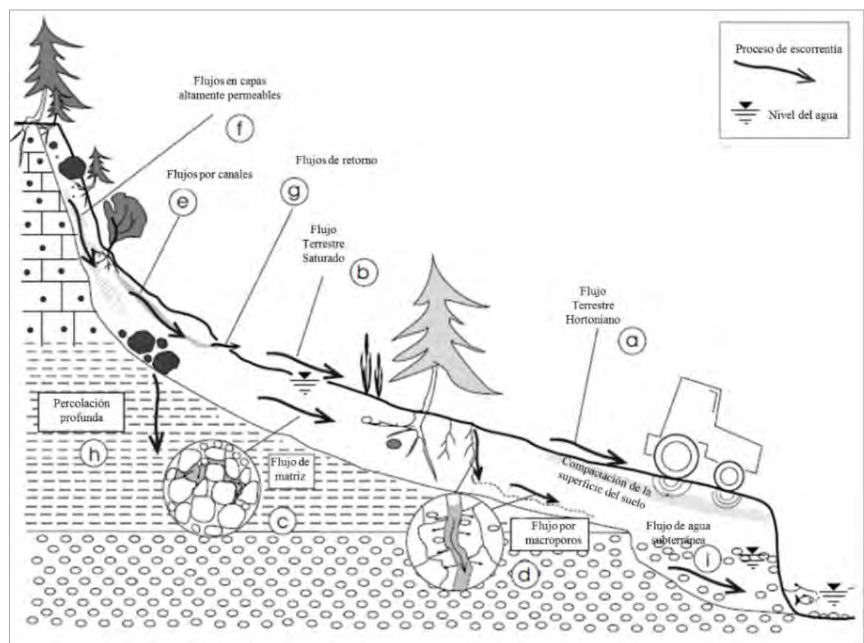


Figura 2: Procesos de escorrentías dominantes sobre una ladera.
Fuente: Schmocker (2004: 4, traducida).

1.2.2.2. Tipos de procesos de escorrentías dominantes

Los tipos de Procesos de escorrentías dominantes se muestran en la Figura 3, de manera general se van a dividir en flujos superficiales y subsuperficiales. (Scherrer y Naef, 2003):

- a. **Flujo superficial:** se presenta cuando la intensidad de la precipitación excede la capacidad de infiltración o cuando este se da sobre suelos impermeables o con baja permeabilidad (Schmocker, 2004), se divide en:
 - **HOF (Flujo Terrestre Hortoniano):** ocurre cuando el suelo esta compactado y la intensidad de la lluvia excede la tasa de infiltración en el suelo y todo el almacenamiento en la superficie se ha llenado. El agua se acumula en la superficie del suelo y comienza a moverse cuesta abajo, debido a la gravedad, con dirección a la red hidrográfica.
 - **SOF (Flujo Terrestre Saturado):** ocurre cuando el suelo está saturado de agua y el almacenamiento de la depresión se llena debido a la elevación del agua subterránea, el flujo base y las descargas laterales del agua subterránea, el agua continua proveniente de la lluvia da como resultado un flujo terrestre saturado.
- b. **Flujo subsuperficial:** se da a partir de agua infiltrada que se almacena en el suelo o fluye vertical y lateralmente, distinguiéndose un flujo en la matriz a partir de micro y meso poros, flujo por macroporos a partir del cual pueden suceder flujos de retorno en presencia de capas altamente permeables o por cambio de la pendiente, flujo por canales de raíces, y cuando la geología presenta grietas se evidencia una percolación profunda (Schmocker, 2004), se divide en:
 - **SSF (Flujo Subsuperficial):** generalmente en horizontes o substrato dentro del suelo impermeables, ocurre en una pendiente empinada que tiene un suelo menos o muy poco profundo con un sistema eficiente de caminos para flujo lateral.
 - **DP (Percolación Profunda):** ocurre en suelos permeables gruesos o poco profundos con substratos muy permeables (suelos arenosos y con presencia de fracturas líticas).

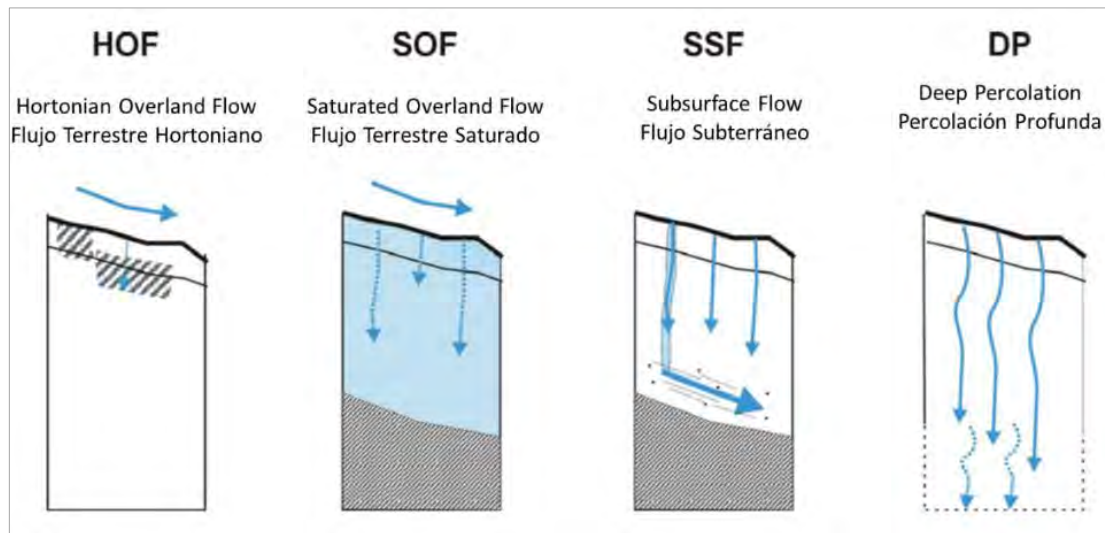


Figura 3: Tipos de escorrentías dominantes.

Fuente: Schmocker (2004: 34, traducida).

La numeración 1,2,3 representan el retraso en su reacción respecto a la lluvia (Scherrer y Naef, 2003). Se asigna el número 1 cuando la reacción es casi inmediata, 2 cuando la reacción es ligeramente retrasada, y 3 cuando la reacción es retrasada (Tabla 2).

Tabla 2: Tipos de flujos considerados en el esquema de decisión.

Proceso	Tipo	Abrev.	Intensidad del proceso de escorrentía
Proceso de flujo terrestre	Hortoniano	HOF1	Flujo Terrestre Hortoniano Inmediato , debido al obstáculo de la infiltración, suelos con macroporosidad baja, pudiendo ser terrenos con alto contenido de arcilla, compactados por maquinaria, confinados por pisoteo de animales, lecho de roca, también es un escurrimiento superficial propio de laderas. (reacción casi inmediata)
		HOF2	Flujo Terrestre Hortoniano Retardado , debido al obstáculo de la infiltración (exceso de infiltración del flujo terrestre), ocurre en terrenos afectados por compresión y de baja susceptibilidad al agua. (reacción ligeramente retrasada)

Proceso de flujo subsuperficial	Saturación	SOF1	Flujo Terrestre Saturado Inmediato , debido a la saturación del suelo. (reacción casi inmediata)
		SOF2	Flujo Terrestre Saturado Retardado , debido a la lentitud. Suelo saturando (reacción ligeramente retrasada)
		SOF3	Flujo Terrestre Saturado Fuertemente Retardado , debido a suelos saturados muy lentamente, ocurre en terrenos con macroporos gruesos con una matriz permeable. (reacción retrasada)
	Flujo lateral	SSF1	Flujo Subsuperficial . (reacción casi inmediata)
		SSF2	Flujo Subsuperficial Retardado . (reacción ligeramente retrasada)
		SSF3	Flujo Subsuperficial Fuertemente Retardado . (reacción retrasada)
	Flujo vertical	DP	Percolación profunda

Nota: HOF= Flujo Terrestre Hortoniano, SOF= Flujo Terrestre Saturado, SSF= Flujo Subsuperficial, DP= Percolación Profunda.

Fuente: Scherrer y Naef (2003: 394, traducida).

1.2.2.3. Parámetros importantes para identificar procesos de escorrentías dominantes

Los procesos de escorrentías dominantes responden a una evaluación exhaustiva de diferentes parámetros, tal es el caso de la cobertura vegetal, sellado de la superficie del suelo, compactación, hidrofobicidad, macroporosidad, geología, rutas de flujo lateral, barreras de flujo vertical, permeabilidad de la matriz, textura del suelo, densidad aparente y profundidad, los que van a servir para definir un modelo de esquema de decisión y por ende clasificar los tipos de escorrentías dominantes en eventos de precipitaciones intensas (Scherrer y Naef, 2003).

Los parámetros evaluados son obtenidos a escala reducida (1:10000), para una mejor interpretación y relación de los datos. Por lo tanto, es importante conocer características tanto de la superficie del suelo, así como de cada horizonte (Figura 4).

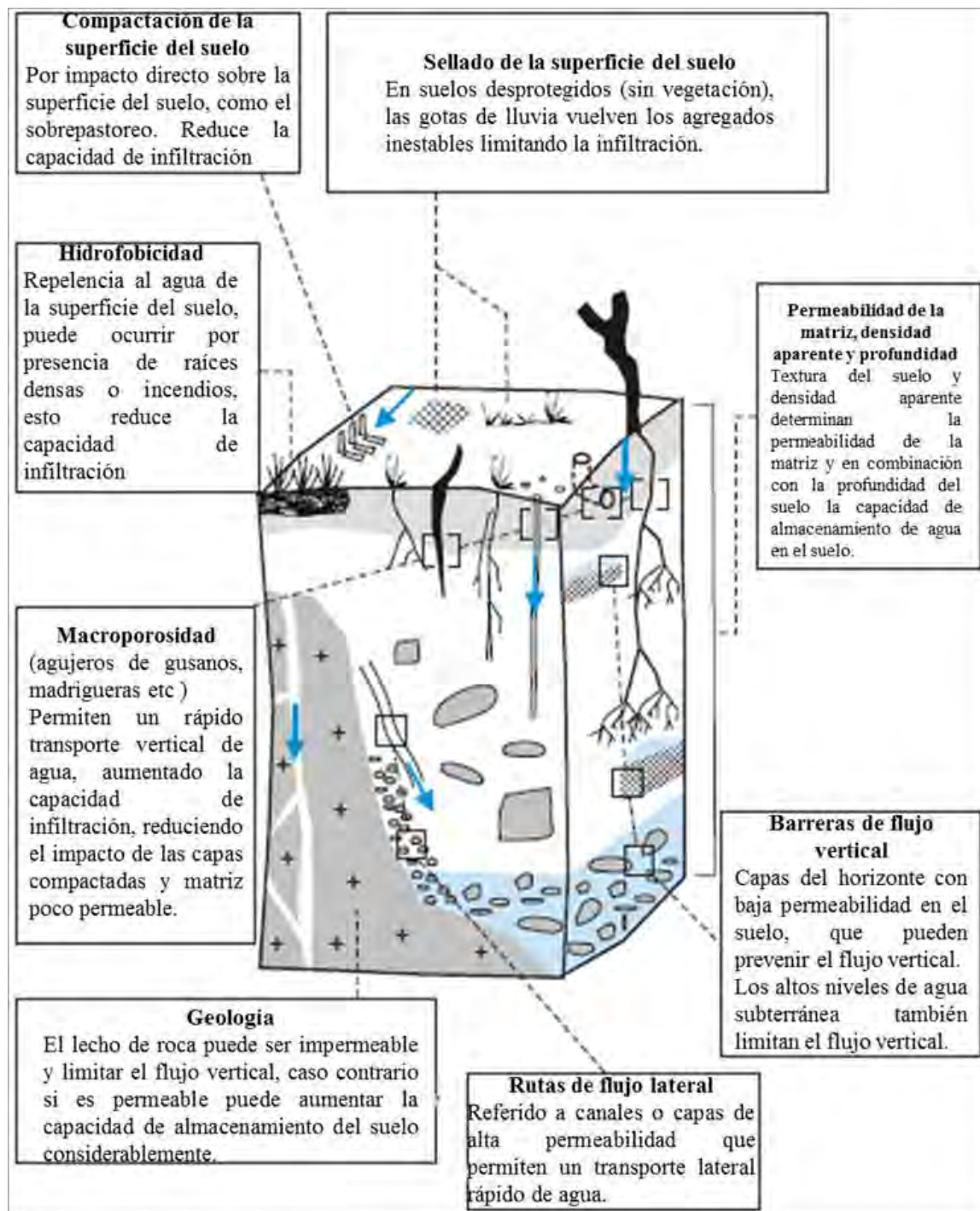


Figura 4: Formación de escorrentía sobre un perfil de suelo.

Fuente: Schmocker (2004: 18, traducida).

a. Sellado de la superficie del suelo.

En suelos con baja cobertura vegetal (<50%), la energía cinética de las gotas de lluvia con alta intensidad puede desintegrar los agregados inestables del suelo, siendo evidente en suelos con bajo contenido de arcilla y poca actividad microbiológica, estas partículas desintegradas forman una costra delgada de baja porosidad y conductividad hidráulica en la superficie del suelo obstruyendo los macroporos (Schmocker, 2004).

b. Compactación del suelo

La compactación de las capas del suelo reduce la conductividad hidráulica y la capacidad de infiltración, esto se debe a propiedades del suelo como la baja densidad aparente, y también al cambio de uso del suelo por actividades agrícolas, pastoreo e intervención con maquinaria pesada (Schmocker, 2004).

c. Hidrofobicidad del suelo

Referido a la repelencia del suelo frente al agua, que reduce la capacidad de infiltración y favorece el flujo hortoniano. Las capas hidrófobas en el suelo pueden formar una barrera de percolación vertical (Schmocker, 2004).

d. Macroporosidad

Los macroporos son importantes para definir tasas altas de infiltración, su identificación va a depender de la alta densidad de macroporos, alto porcentaje de poros orientados verticalmente, continuidad de los poros, y si existe buena interacción entre los macroporos y la matriz del suelo, siendo considerado macroporosidad alta a partir de 40 Mp/m² (Schmocker, 2004).

e. Textura de suelo

Es la propiedad física derivada de la composición granulométrica, constituida por arena, limo y arcilla, cuyos diámetros están contempladas en la escala de la Sociedad Internacional de la Ciencia del Suelo (USDA, 1999).

f. Densidad aparente

La densidad aparente se define como la masa de suelo por unidad de volumen (g/ cm³ o t/m³). Define la compactación del suelo, identificando la relación entre sólidos y espacio poroso, por lo que cuanto mayor la densidad, menor es el espacio poroso para el movimiento del agua, crecimiento, penetración de raíces, y el desarrollo de las plántulas (USDA, 1999).

g. Permeabilidad de la matriz

La permeabilidad de la matriz, es un parámetro que influye en la velocidad del flujo de agua en la matriz del suelo, definiendo alta, media o baja permeabilidad. Para su identificación es importante conocer la textura del suelo (limo y arcilla), la densidad aparente y el uso de una matriz de permeabilidad (Schmocker, 2004).

h. Potencial de hidrogeniones

El pH es el logaritmo negativo de la concentración de iones H^+ disociado en la solución suelo (USDA, 1999). El $pH < 5$ (ácido), afecta la idoneidad ecológica para la microbiota responsables de la macroporosidad (Schmocker, 2004).

i. Materia orgánica

La materia orgánica del suelo está formada por restos vegetales y animales en cantidades variables de naturaleza amorfa llamada humus, siendo el carbono el principal elemento contenido en estos compuestos orgánicos. La materia orgánica va a mejorar las propiedades del suelo proporcionando nutrientes a las plantas, además permite una buena aireación, drenaje, filtración y porosidad (USDA, 1999).

j. Infiltración

La velocidad de infiltración es una medida de cuán rápidamente el agua penetra en el suelo, cuando este valor es lento provoca anegamiento en terrenos planos o erosión en terrenos en pendiente (USDA, 1999).

k. Pendiente del terreno

La pendiente es una forma de medir el grado de inclinación del terreno. A mayor inclinación mayor valor de pendiente. La pendiente se mide dividiendo el cambio vertical en altitud entre la distancia horizontal. En lugar de expresarla como un ángulo, es más interesante representar la pendiente del terreno como un valor de tanto por ciento. Esto se obtiene multiplicando por 100 la tangente del ángulo que define el desnivel del suelo (Muller et al., 2009).

1. Capacidad de flujo lateral

Una alta capacidad de flujo lateral requiere rutas de flujo laterales preferenciales, como conductos y capas altamente permeables de longitud suficiente para influir en el proceso de flujo en la escala de la pendiente. Los conductos a menudo se forman en una capa con una permeabilidad lateral y un gradiente hidráulico lo suficientemente alto como para permitir grandes cantidades de flujo lateral por encima de una capa con una reducción marcada en la permeabilidad vertical (Schmocker, 2004).

1.2.2.4. Clasificación hidrológica de procesos de escorrentías dominantes

La clasificación de procesos de escorrentías dominantes puede ser manual o automática (Tabla 3). Los enfoques manuales se basan en extensas investigaciones de campo y mucha interpretación de los resultados (p. ej., Scherrer y Naef, 2003). Los métodos automáticos generalmente se basan en aplicación de Sistemas de Información Geográfica y en algoritmos (p. ej., Muller et al., 2009). Los enfoques automáticos difieren en qué datos requieren, algunos se basan solo en información topográfica (p. ej., Gharari et al., 2011), mientras que otros utilizan toda la información disponible para un área (p. ej., Schmocker et al., 2007). El requisito de datos está estrechamente vinculado al tiempo que lleva mapear los procesos de escorrentías dominantes, que van desde unas pocas horas con entrada de datos simple, hasta meses, si los datos se derivan de investigaciones de campo exhaustivas.

Tabla 3: Lista de clasificación hidrológica de procesos de escorrentías dominantes.

	Evaluación	Topografía	Uso de suelo	Geología	Mapas de suelo	Mapas de drenaje	Mapas de vegetación	Investigación extensiva de campo
Boorman et al (1995)	A				X			
Peschke et al (1999)	A	X	X	X	X			
Tilch et al (2002)	M	X		X				
Waldenmeyer (2003)	A	X					X	
Scherrer y Naef (2003)	M	X	X	X	X	X	X	X
Schmocker et al (2007)	A	X	X	X	X	X	X	X
Tetzlaff et al (2007)	A	X	X	X				X
Müller et al (2009)	A	X	X	X				
Gharari et al (2011)	A	X						

Hümann y Müller (2013)	A	X	X	X
Gao et al (2014)	A	X	X	

Nota: A= automático, M= manual.

Fuente: Antonetti et al (2016: 2930, traducida).

a. Evaluación manual de los procesos de escorrentías dominantes

La evaluación manual de los procesos de escorrentías dominantes, están basadas en extensas investigaciones de campo, mucha interpretación y ampliación de los resultados (Antonetti et al., 2016).

Scherrer y Naef (2003), desarrollaron un esquema de decisión para indicar los procesos de escorrentías dominantes (DRP) en cuetas templadas para pastizales de Zúrich (Suiza). Dicho esquema permite calificar y cuantificar zonas de flujo después de eventos de precipitaciones intensas. El esquema requiere aporte de propiedades hidrológicas de la superficie y de cada horizonte principal del terreno (Figura 5).

b. Evaluación automática de los procesos de escorrentías dominantes

La evaluación automática de los procesos de escorrentías dominantes, están basados en la aplicación de Sistemas de Información Geográfica y algoritmos bien elaborados (Antonetti et al., 2016).

Muller et al (2009), proponen dos enfoques para identificar procesos de escorrentías dominantes (DRP), con relación a la regionalización. El primer acercamiento combina la permeabilidad del substrato, uso de suelos y la pendiente en un análisis basado en Sistemas de Información Geográfica (SIG). El segundo acercamiento hace uso de análisis discriminatorio de las características fisiográficas y lo asocia con la pendiente mediante un análisis en Sistemas de Información Geográfica (Tabla 4). Ambos enfoques, fueron comparados con un mapa generado in situ según el esquema de decisión para procesos de escorrentías dominantes, resultando que el primer acercamiento es preferido al segundo acercamiento en cuanto a la exactitud, la entrada de datos y el tiempo de cálculo.

Tabla 4: Procesos de escorrentías dominantes automático.

Pendiente (%)	Sustrato impermeable Hierba y suelo arable	Sustrato impermeable Bosque	Sustrato permeable Hierba, suelo arable y bosque
0 – 3	<i>SOF3</i>	<i>SOF3</i>	<i>DP</i>
3 – 5	<i>SOF2</i>	<i>SSF3</i>	<i>DP</i>
5 – 20	<i>SSF2</i>	<i>SSF2</i>	<i>DP</i>
20 – 40	<i>SSF1</i>	<i>SSF2</i>	<i>DP</i>
>40	<i>SSF1</i>	<i>SSF1</i>	<i>DP</i>

Nota: SOF= Flujo terrestre saturado, SSF= Flujo subterráneo, DP= Percolación profunda.

Fuente: Muller et al (2009: 784, traducida).

Schmocker et al (2007), desarrolló una estrategia para simplificar el esquema decisión propuesto por Scherrer y Naef en el 2003, combinando información de campo con información satelital, mediante plataformas de sistemas de información geográfica para mapear procesos de escorrentías dominantes. A partir de la información procesada sobre un mapa de alta resolución (1:5000) desarrolla un esquema de decisión generalizado para identificar procesos de escorrentías dominantes (Figura 6).

Gharari et al (2011), encuentra que la combinación entre el drenaje más cercano y la pendiente proporcionan adecuados descriptores para la clasificación de procesos de escorrentías dominantes basados en la topografía.

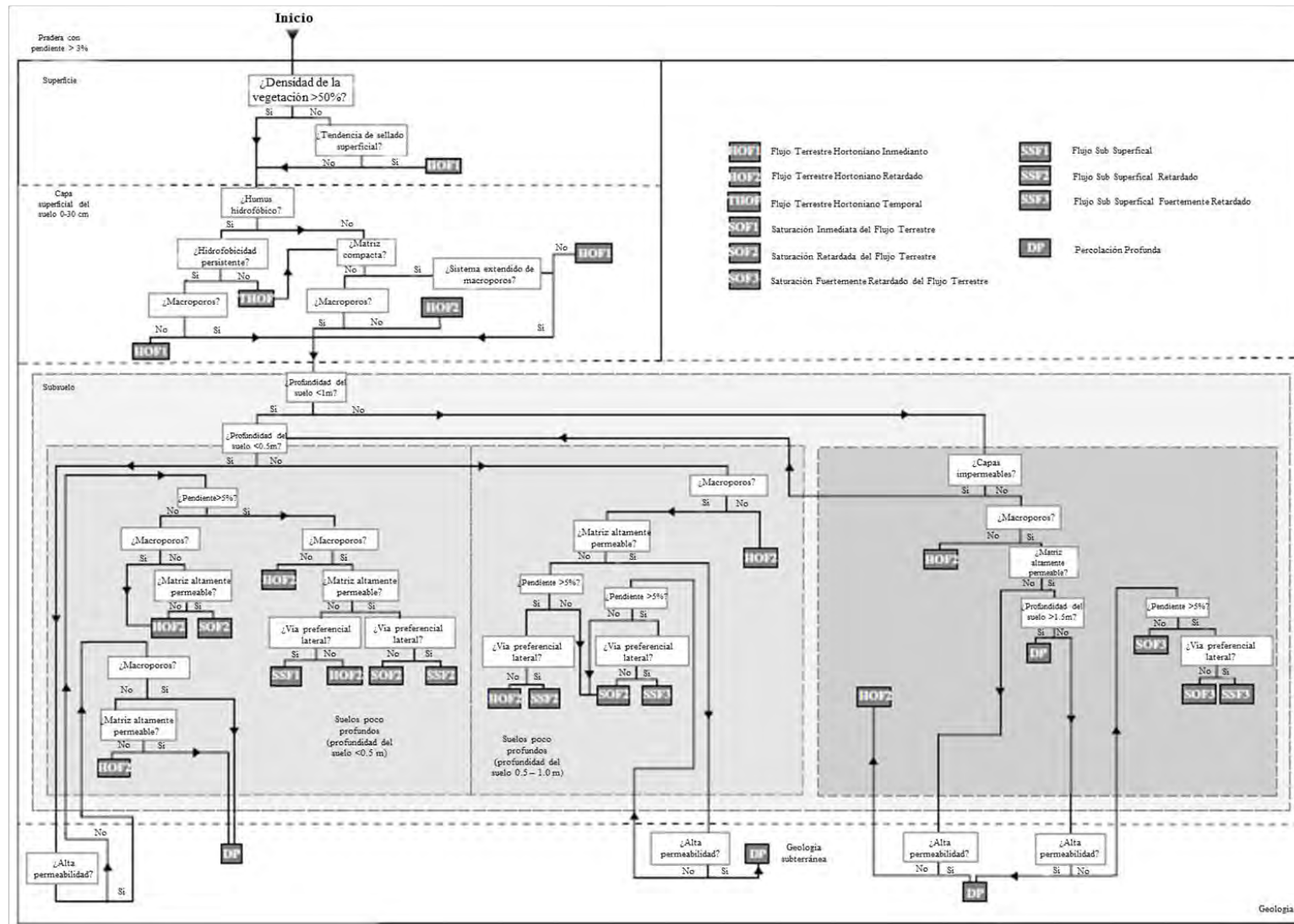


Figura 5: Esquema de decisión para praderas con pendientes mayores a 3%.

Fuente: Scherrer y Naef (2003: 398, traducida).

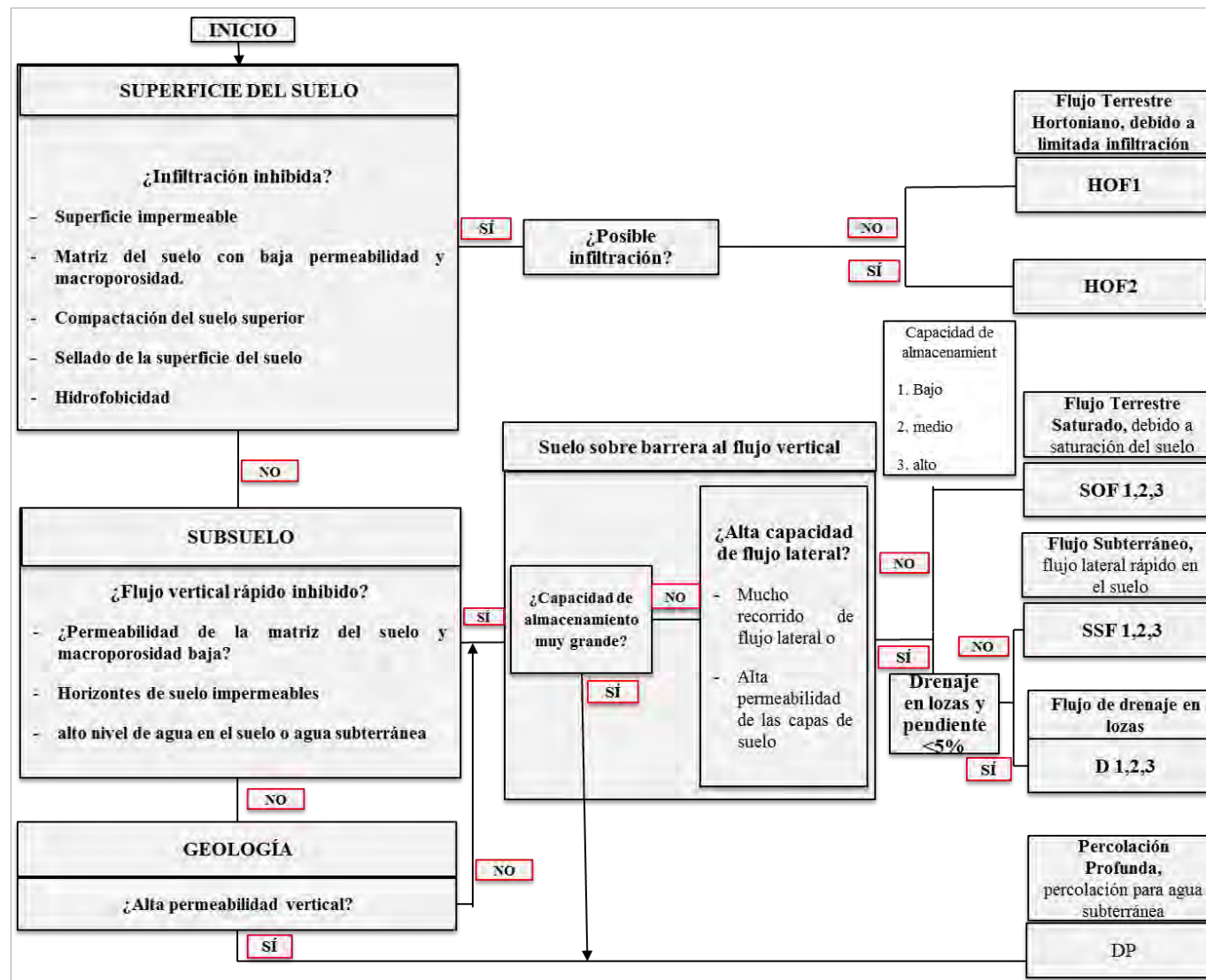


Figura 6: Esquema generalizado de decisión para procesos de escorrentías dominantes.

Fuente: Schmocker et al (2007: 895, traducida).

1.2.3. Ecohidrología

La ecohidrología apunta a ser una nueva ciencia innovadora, analizando las interrelaciones funcionales entre la hidrología, los procesos involucrados en un ecosistema y su biota (Martínez y Villalejo, 2019).

Según Zalewski et al., (1997), entender y comprender los procesos ecohidrológicos mejora las capacidades predictivas para un manejo eficiente de los sistemas hídricos y de los paisajes, basado en restablecer y mantener los procesos evolutivos de circulación del agua, amplificar la capacidad de carga y resiliencia de los ecosistemas frente a la presión antrópica y usar las propiedades de los ecosistemas como herramientas de gestión del agua.

La caracterización ecohidrológica del paisaje, permite identificar la distribución de varios tipos de biocenosis y su potencial, a diferentes escalas, y la relación que guarda con el ciclo del agua (García y Otto, 2015).

1.2.3.1. Influencia de la vegetación en el ciclo hidrológico

Bajo el principio ecológico, que consiste en el uso de la biota para controlar los procesos hidrológicos y viceversa (Martínez y Villalejo, 2019), la vegetación y el ciclo del agua están estrechamente acoplados, se trata de una conectividad hidrológica definida por la interacción entre determinados niveles y flujos en el ecosistema (Asbjornsen et al., 2011).

La importancia de esta relación en los humedales, se demuestra al examinar sus vínculos con las áreas aledañas al humedal, conocidas como unidades de paisaje individuales, que ejerce un control significativo sobre el movimiento del agua en una cuenca, donde la estructura y actividad biótica regulan los procesos hidrológicos y del mismo modo, los procesos hidrológicos moderan la estructura y actividad biótica, para finalmente determinar funciones y servicios ecosistémicos a múltiples escalas (Valencia y Tobón, 2017).

En ecosistemas altoandinos el ciclo hidrológico se presenta consecutivamente en orden a la dirección del flujo de agua (Figura 7), que obedece a procesos que incluye entradas por precipitación en todas sus formas (vertical y horizontal), precipitación neta dentro del ecosistema, agua en el horizonte orgánico, escorrentía superficial, infiltración por la precipitación, evapotranspiración, agua en el suelo, percolación profunda y drenaje a nivel de cuenca (Tobón, 2009).

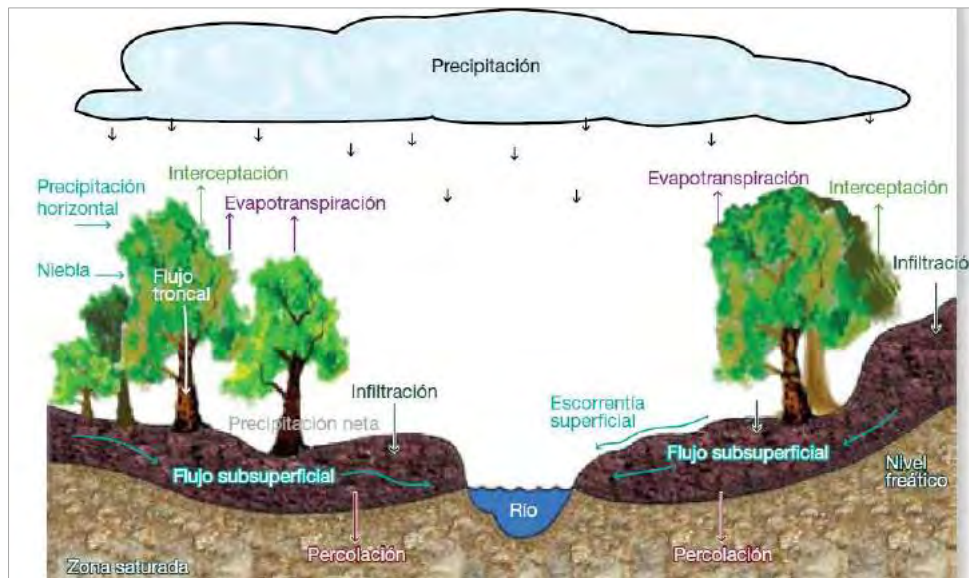


Figura 7: Relación entre la dirección del flujo de agua y la vegetación.

Fuente: Tobón (2009: 18).

La vegetación dominada por los pastizales o de bajo porte, poseen importantes funciones eco-hidrológicas, como la interceptación de lluvia y almacenamiento de agua en suelo y drenaje profundo (Newman et al., 2006), a su vez, cumplen un rol importante en el incremento de flujos subsuperficiales (Mosquera et al., 2021), ayudando a la retención de sedimentos y escurrimientos, mejorando la infiltración y fijación de carbono que se llevan a cabo gracias a los hábitos de crecimiento, a su estructura fisiológica y su interacción con el medio ambiente (Garcia et al., 2011). Sin embargo, este conocimiento es muy escaso en laderas (Zhang et al., 2000) y en muchos ecosistemas terrestres altoandinos, siendo difícil de medir por su complicada arquitectura foliar, porte bajo y dosel abierto de gramíneas.

1.2.3.2. Precipitación y su relación con la interceptación por la vegetación

La interceptación de la lluvia por el dosel de la vegetación, es una etapa importante, donde el agua que se encuentra en la fase atmosférica pasa a la fase terrestre (Garcia et al., 2011), y así se determina la cantidad de agua que llega a la superficie del suelo controlando su contenido, el cual está caracterizado por la mojadura, que es relevante en la infiltración o escorrentía.

La cantidad de precipitación interceptada va a depender de características de la vegetación y de la propia lluvia. En la vegetación será determinante la edad, orientación, forma de hojas, ángulo de las ramas y tipo de corteza (Crockford y Richardson, 2000); mientras que la intensidad, duración, y variables climáticas como la temperatura, velocidad y dirección del viento serán determinantes evaluar para la propia lluvia (Pérez et al., 2014).

La cubierta vegetal divide a la precipitación en tres componentes (García et al., 2014):

- a. Translocación total, es la cantidad de precipitación que llega al suelo, a partir de la suma entre la translocación libre (precipitación que pasa libremente por el dosel de la vegetación) y la translocación por goteo (precipitación interceptada por el dosel de la vegetación).
- b. Escorrentía cortical, es la cantidad de precipitación que llega al suelo por medio del fuste de la vegetación.
- c. Fracción de precipitación que no alcanza el suelo.

Así el agua retenida a través de las hojas y ramas tiende a evaporarse desde sus superficies, y que junto a la respiración de las plantas, se lleva a cabo el proceso denominado evapotranspiración, lo que hace que las plantas sean uno de los principales conductos para el retorno del agua terrestre a la atmósfera (Asbjornsen et al., 2011).

Posteriormente, la infiltración será determinante para retener agua reflejada en la recarga del acuífero y va a depender del contenido de agua inicial (Zhang et al, 2000), este proceso se da cuando el suelo es completo, ósea su porosidad se une a su higroscopicidad, constituyendo un almacén de este líquido en cantidad y tiempo que notablemente puede ser controlado por los sistemas radiculares de la vegetación que están instaladas sobre él (García et al., 2011). El otro proceso recurrente es la escorrentía que va a determinar un flujo superficial, en referencia algunos estudios han determinado que existe una relación inversa entre el grado de cobertura vegetal y la escorrentía (Serrano et al., 2013).

1.2.4. Teledetección (*Remote Sensing*)

Conocido también como Percepción Remota, es una ciencia que integra un amplio conjunto de conocimientos y tecnologías utilizadas para la observación, el análisis y la interpretación de fenómenos terrestres y atmosféricos (Tupin et al., 2014), a través del cual se puede adquirir imágenes de la superficie terrestre desde sensores aéreos o espaciales. En el proceso se obtiene información de un objeto sin tener contacto directo con él, esto es posible gracias a la relación sensor - cobertura, la cual expresa a través de la llamada radiación electromagnética (Chuvieco, 2008).

1.2.4.1. Naturaleza de la radiación.

La energía capturada por el sensor es la que inicialmente provee el sol. La energía del sol se propaga a través del vacío del espacio a la velocidad de la luz (299.792,458 km/s) hasta estrellarse con el campo magnético de la tierra. El modelo de onda asume que la radiación se produce en forma de ondas que resultan de oscilaciones en los campos eléctrico y magnético en las inmediaciones de los objetos y se desplazan por el espacio a la velocidad de la luz. Las ondas se definen fundamentalmente por su longitud (λ) o distancia entre dos picos de onda (se mide en μm). El modelo de partícula asume que la energía viaja como un flujo de elementos discretos: los fotones. La energía transportada por cada fotón (Q) depende de la longitud de onda. A su paso los fotones interactúan con la atmósfera terrestre retro dispersándose o transformándose y finalmente alcanza los sistemas de medición a bordo de las plataformas aéreas o espaciales, para luego ser transmitidas a estaciones de recepción distribuidas por el planeta tierra (Adams y Gillespie, 2006).

1.2.4.2. Interacciones entre la radiación y los objetos de la superficie terrestre

Todos los objetos, independientemente de la radiación que emitan, van a recibir radiación, fundamentalmente del sol, que, en función del tipo de objeto que estemos considerando, puede seguir tres caminos (Bravo, 2017):

- reflejarse (la radiación es reenviada de vuelta al espacio)
- absorberse (la radiación pasa a incrementar la energía del objeto)
- transmitirse (la radiación se transmite hacia los objetos situados detrás).

De cara a la identificación de objetos y procesos en la superficie terrestre, lo que nos interesa es la reflectancia de estos objetos respecto a las diferentes longitudes de onda. Cada tipo de material, suelo, vegetación, agua, etc. reflejará la radiación incidente de forma distinta, lo que permitirá distinguirlo de los demás si medimos la radiación reflejada (efecto albedo).

1.2.4.3. Componentes de un sistema de teledetección

Según Chuvieco (2008), el sistema de teledetección incluye los siguientes elementos (Figura 8):

- a. Fuente de energía: referido a la radiación electromagnética que el sensor va a captar; puede ser ‘pasiva’, cuando se capta la energía solar, o ‘activa’, cuando es emitida por el propio sensor.
- b. Cubierta terrestre: rasgos naturales que interactúan con la radiación emitida por el sol o por el sensor.
- c. Sistema sensor: compuesto por el sensor propiamente dicho (cámara, radar) y la plataforma que lo alberga (satélite, avión), en conjunto captan la energía proveniente de la tierra.
- d. Sistema de recepción – comercialización: recibe la información proveniente del sensor para su posterior distribución a los usuarios.
- e. Interprete: persona especialista que procesa la información cruda para generar información temática.
- f. Usuario final: beneficiario de la información temática para la posterior toma de decisiones.

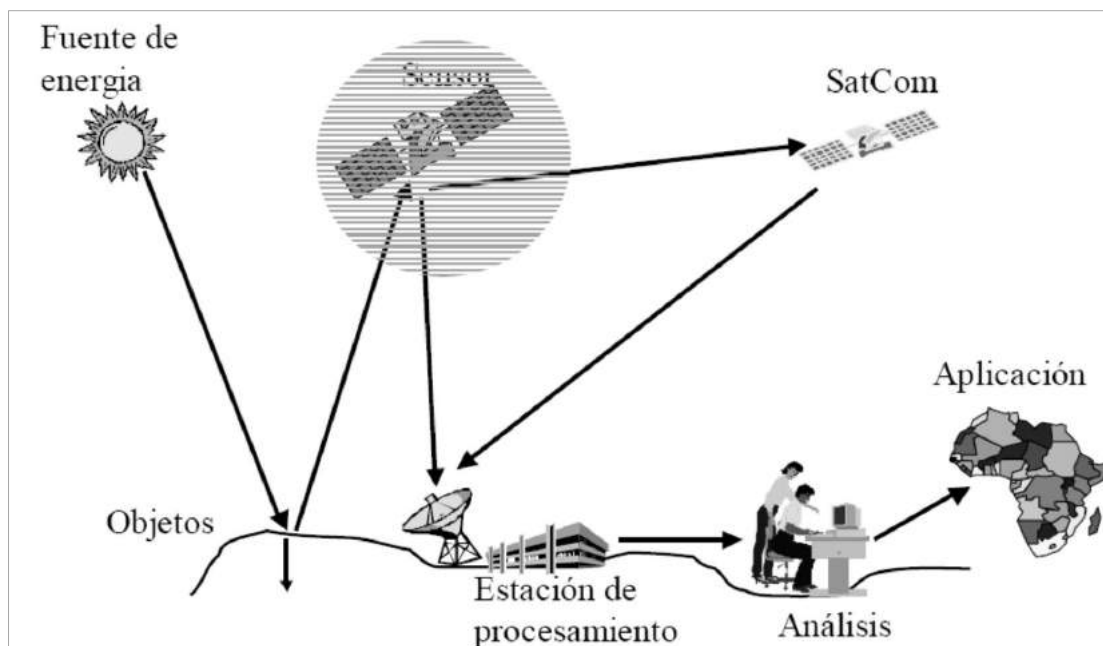


Figura 8: Componentes de un sistema de teledetección.

Fuente: Chuvieco (2008: 19).

1.2.4.4. Espectro electromagnético

Según la Agencia Espacial de los Estados Unidos (NASA), el espectro electromagnético, es el sistema que clasifica, de acuerdo con la longitud de onda, toda la energía que se mueve armónicamente, a la velocidad constante de la luz (Figura 9).

1.2.4.4.1. Regiones espectrales para la percepción remota de la tierra

Las regiones espectrales para la percepción remota de la tierra, están clasificadas en:

- Espectro visible (0.4-0.7 μm): rango de frecuencia del ojo humano. Involucra tres bandas rojo (0.6-0.7 μm), verde (0.5-0.6 μm) y azul (0.4-0.5 μm).
- Infrarrojo cercano (0.7-1.1 μm): energía solar que reflejan los cuerpos, detecta masas vegetales y concentraciones de humedad.
- Infrarrojo medio (1.1-8 μm): entremezcla de radiación solar y emisión, detecta humedad de la vegetación y focos de alta temperatura.
- Infrarrojo térmico (8-14 μm): detecta el calor proveniente de la mayor parte de la cubierta terrestre.
- Microondas (1mm-1m): Radiación de grandes longitudes de onda, capaces de penetrar nubes, nieblas y lluvia.

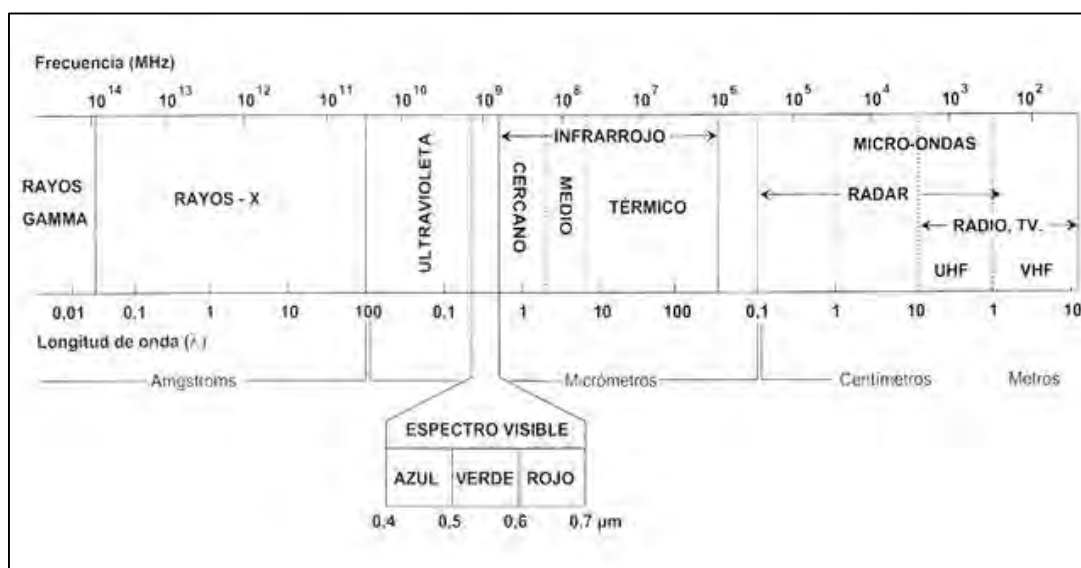


Figura 9: Espectro electromagnético.

Fuente: Chuvieco (2008: 47).

1.2.4.5. Firma espectral

La firma espectral es la reflectancia como una función de longitud de onda (Figura 10), cada material tiene una firma única, por lo tanto, se puede utilizar para la clasificación de materiales (Bravo, 2017).

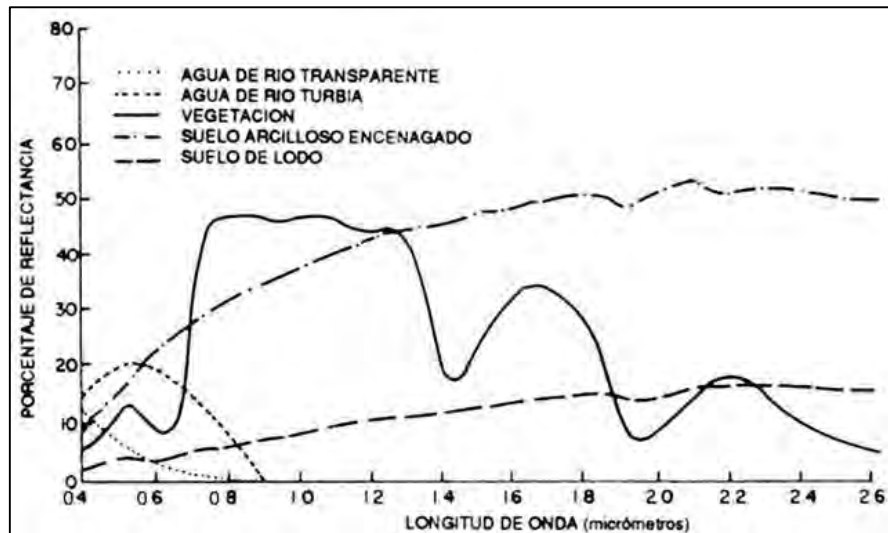


Figura 10: Firma espectral característica de diferentes elementos terrestres.
Fuente: Bravo (2017).

1.2.4.6. Sensores remotos

Los sensores registran la radiación electromagnética que proviene de las distintas coberturas y las almacena en cada píxel (celdas), de acuerdo a los intervalos de longitudes de onda, en las que este programado el sensor para captar (Bravo, 2017), dicha información captada se modela bajo diferentes índices orientados a la vegetación temperatura, evapotranspiración, etc.

La clasificación de los sensores es en base a la naturaleza de la energía utilizada, estos son:

- Sensores pasivos: reciben señales emitidas naturalmente por parte del sol y reflejadas por los objetos percibidos en la superficie terrestre (Landsat, Sentinel).
- Sensores activos: emiten su propia radiación hacia el objeto que se quiere estudiar (Lidar, Radar).

1.2.4.6.1. Satélite Sentinel -2

Sentinel-2 es una misión de la agencia europea, de imágenes multispectrales de alta resolución espacial (10m) en órbitas polar para el monitoreo de la tierra y está diseñado como una constelación de dos satélites: Sentinel-2A y -2B que permiten obtener información de la superficie de la tierra ubicados a 786 km de la superficie terrestre, con una resolución temporal de 5 días y una resolución radiométrica de 12 bits (4095 tipos de

gris). Sentinel-2A se lanzó el 23 de junio de 2015 y el Sentinel-2B se lanzó el 7 de marzo de 2017.

El Sentinel-2 tiene un escáner multi espectral, con 13 bandas (Tabla 5), que permite obtener información en las dos longitudes de onda, visibles e infrarrojos, permitiendo monitorizar los cambios en la tierra y en la vegetación, así como vigilar a nivel mundial el cambio climático, con una resolución de 10m. Las imágenes están disponibles de manera gratuita y pueden ser utilizadas en un rango amplio de aplicaciones (Bravo, 2017).

Tabla 5: Resolución espacial de las bandas del satélite Sentinel 2B.

	Banda	Resolución (m)
1	Costero aerosol	60
2	Azul	10
3	Verde	10
4	Rojo	10
5	Visible e infrarrojo cercano (VNIR)	20
6	Visible e infrarrojo cercano (VNIR)	20
7	Visible e infrarrojo cercano (VNIR)	20
8	Visible e infrarrojo cercano (VNIR)	10
8A	Visible e infrarrojo cercano (VNIR)	20
9	Vapor de agua	60
10	Cirrus	60
11	Onda corta infrarroja (SWIR)	20
12	Onda corta infrarroja (SWIR)	20

Fuente: Bravo (2017: 27).

1.2.4.7. Imagen Digital

Se define a una imagen digital como un arreglo de números que representa una distribución espacial de ciertos parámetros de campos, como la reflexión de energía electromagnética, emisión, temperatura, o alguna variable de elevación topográfica o geofísica, y está conformada por elementos conocidos con píxeles organizados en filas y columnas (Chuvieco, 2008).

1.2.4.7.1. Caracterización de una imagen digital

Las imágenes poseen unas propiedades específicas en cuanto a su capacidad de registrar y discriminar la información a detalle, se denomina como la resolución de imágenes y según Chuvieco (2008), se divide en cuatro tipos:

- a. Resolución espacial definido por el elemento más pequeño que puede ser discriminado en una imagen.

- b. Resolución espectral que indica el ancho y número de bandas espectrales que posee una imagen.
- c. Resolución radiométrica que representa la capacidad del sensor para detectar las variaciones en la radiación espectral que recibe.
- d. Resolución temporal que es la frecuencia con la que se adquieren las imágenes de la misma porción terrestre y la cual depende de la altura, velocidad e inclinación de la plataforma, así como el ángulo de inclinación.

1.2.4.7.2. Pre procesamiento de imágenes satelitales

El pre procesamiento de las imágenes, se refiere a realizar las correcciones de imágenes, con el fin de eliminar cualquier anomalía o perturbación detectada en la imagen, ya sea en su localización o radiometría de los píxeles que la componen (Gonzaga, 2014).

Se trata de las siguientes correcciones:

- a. Corrección geométrica, referida a la modificación de la imagen respecto a la geometría de las superficies terrestres.
- b. Corrección radiométrica, que busca mejorar la precisión de las medidas de reflectancia, eliminando los ruidos de los niveles digitales de la imagen compensando las diferencias en los valores de radiancia y la conversión de los niveles digitales a valores de radiancia y reflectancia, utilizando modelos de atmósfera y las geometrías de iluminación/observación.
- c. Corrección atmosférica, realizadas sobre el efecto de la atmósfera que no es constante en la imagen, solo algunas zonas pueden estar afectadas más que otras, en función de la diversa presencia de aerosoles, vapor de agua o nubes.
- d. Corrección topográfica, entendida como la obtención de información sobre la superficie del terreno a partir de imágenes satelitales, la iluminación oblicua y una topografía irregular genera unos efectos de sombreado e iluminación que modifican la respuesta debida exclusivamente al tipo de superficie.

1.2.4.7.3. Composición de color

La visualización de las imágenes de teledetección es mejor cuando se tiene una representación en colores, ya que el ojo humano percibe mejor las diferencias de color que los niveles de gris. Para poder ver las imágenes de teledetección en colores, se hace una combinación de tres bandas, que recibe el nombre de imagen de color compuesta. Las imágenes de las distintas bandas se pueden combinar entre ellas para producir una imagen

en color real o en falso color en función de las bandas escogidas (Chuvieco, 2008). Esto se hace asignando a cada uno de los canales (RGB) de la pantalla de ordenador, una banda en particular.

1.2.4.8. Sistemas de Información Geográfica (SIG)

El Centro Nacional de Información Geográfica y Análisis de los Estados Unidos, lo define como sistemas de hardware, software y procedimientos elaborados para facilitar la obtención, gestión, manipulación, análisis, modelado, representación y salida de datos espacialmente referenciados para resolver problemas complejos de planificación y gestión.

La base de un sistema de información geográfica es una serie de mapas digitales representando diversas variables, o bien mapas que representan diversos objetos a los que corresponden varias entradas en una base de datos. Esta estructura permite combinar, en un mismo sistema, información con orígenes y formatos muy diversos lo que permite incrementar el grado de conocimiento (Chuvieco, 2008).

Para el tratamiento de este tipo de sistemas, se han desarrollado un tipo específico de aplicaciones informáticas que popularmente se conocen como SIG, compatible con modelos raster, que dividen el área de estudio en una agrupación de celdas cuadradas ordenadas en una secuencia específica, cada una de estas celdas recibe un único valor que se considera representativo para toda la superficie abarcada por la celda, por tanto, se considera que el modelo raster cubre la totalidad del espacio, por ende, un conjunto de celdas, junto con sus valores se denomina una capa raster (Bravo, 2017).

Los Sistemas de Información Geográfica (SIGs), permite realizar aproximaciones ecohidrológicas basados en los subsistemas de cuencas consistentes de ecotonos y conjuntos elementales, cuya información generada en estas microescalas, podría agregarse a sistemas en niveles altos de modelación de la cuenca.

1.2.4.8.1. Modelo Raster

Este modelo responde a una concepción del mundo como un continuo que puede describirse mediante un número de variables (altitud, pendiente, temperatura media, tipo de suelo, etc.) que toman valores diferentes en diferentes localizaciones definidas por un sistema de coordenadas. Cada variable se representa así mediante una capa. El modelo

vectorial responde a una concepción del mundo basada en objetos con límites definidos (Bravo, 2017).

1.2.4.8.2. Modelo vectorial

El otro modelo principal de representación es el modelo vectorial. En este modelo, no existen unidades fundamentales que dividen la zona recogida, sino que se recoge la variabilidad y características de esta mediante entidades geométricas, para cada una de las cuales dichas características son constantes. La forma de estas entidades (su frontera), se codifica de modo explícito, a diferencia del modelo raster, donde venía implícita en la propia estructura de la malla (Bravo, 2017).

Si el modelo raster era similar al modelo conceptual de campos, el vectorial lo es al de entidades discretas, pues modeliza el espacio geográfico mediante una serie de primitivas geométricas que contienen los elementos más destacados de dicho espacio. Estas primitivas son de tres tipos: puntos, líneas y polígonos (Bravo, 2017).

1.2.4.8.3. Análisis de imágenes de satélite en un SIG

Una imagen de satélite en bruto, tal como normalmente llega al usuario final, consiste en un conjunto de matrices, una por cada canal del sensor, en la que aparecen números del 0 al 255. El cero indica que no llega nada de radiación desde ese punto y el 255 que llega el valor más alto de radiación.

El tratamiento de una imagen de satélite previo a su análisis incluye: preprocesamiento de la imagen satelital (corrección geométrica, radiométrica, atmosférica y topográfica). visualización y composiciones de color, obtención de variables físicas a partir de los valores de reflectancia y clasificación de la imagen (Bravo, 2017).

1.2.4.9. Índices espectrales de vegetación

Referido a un parámetro calculado a partir de los valores de reflectancia a diferentes longitudes de onda, donde interaccionan las ondas electromagnéticas y la vegetación, para extraer de los mismos la información evaluando el estado y la cantidad de la vegetación minimizando las perturbaciones del suelo y la atmosfera (Bannari et al., 1995).

A partir de una sección transversal de la hoja, la clorofila no absorbe toda la luz del sol uniformemente. Las moléculas de clorofila preferentemente absorben la luz roja y azul para

usar en la fotosíntesis, ellas deben absorber tanta cantidad como 70% a 90 % de la luz incidente en esas regiones. En el espectro cercano al infrarrojo, la reflexión de la hoja es controlada por la estructura del tejido esponjoso (mesofilo esponjoso). La cutícula y la epidermis son mayormente transparentes a la radiación infrarroja, entonces una muy pequeña radiación es reflejada de la parte exterior de la hoja. La radiación que pasa a la epidermis superior es fuertemente esparcida por el tejido esponjoso y las cavidades dentro de la hoja. Muy poca de esta energía infrarroja es absorbida internamente, es principalmente (por encima del 60%) esparcida de manera ascendente (la que se llama energía reflejada) o descendente (energía transmitida). Entonces la estructura interna de la hoja es responsable por el brillo de la reflectancia infrarroja de la vegetación viva.

En el borde del espectro visible la absorción de la luz roja por los pigmentos de clorofila empieza a declinar, y la reflectancia crece abruptamente. Entonces, si la reflectancia es considerada no sólo en el visible, pero a través del visible e infrarrojo cercano, la reflectancia pico de la vegetación viva no está en el verde, pero sí en el infrarrojo cercano. Este comportamiento explica la gran utilidad del espectro infrarrojo cercano para los estudios de vegetación y, por supuesto, facilita la separación de las superficies de vegetación de las superficies sin vegetación, que son usualmente muy oscuras en el infrarrojo cercano. Además, las diferencias en la reflectancia de las especies de plantas frecuentemente son más pronunciadas en el infrarrojo cercano (Figura 11).

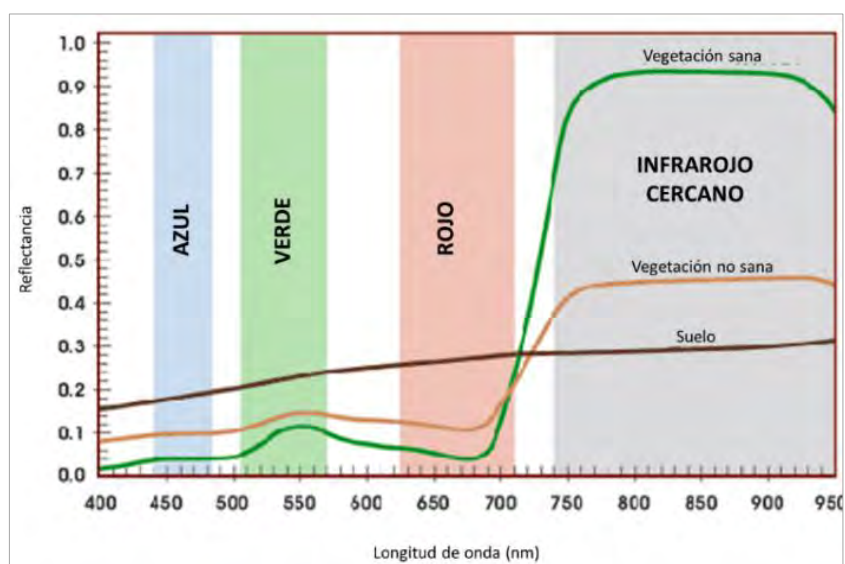


Figura 11: Reflectancia en las bandas del rojo, azul e infrarrojo cercano.

Fuente: Gonzaga (2014: 42, modificado).

Por lo tanto, la vegetación tiene un comportamiento distinto en cada longitud de onda en función de su estado vegetativo (Esparza, 2013), y como principio genérico se afirma que, cuanto mayor sea el contraste entre las bandas del rojo y el infrarrojo, indica un alto valor del índice, por ende mayor será la cobertura vegetal y/o el vigor de la vegetación o por el contrario su débil vitalidad, por lo tanto su discriminación será más clara frente a otro tipo de coberturas (Chuvieco, 2008).

Los índices espectrales generan alternativas viables para analizar la vegetación y sus cambios, o la relación con otros parámetros que asumen que el incremento de la vegetación en algunos lugares es debido a la temperatura y precipitación (Alatorre et al., 2010), por lo tanto, son clave para evaluar los recursos naturales.

a. Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)

Índice basado en un intento de realzar las diferencias en la reflectancia entre las regiones espectrales del rojo y el infrarrojo cercano describe la biomasa de una región a otra, puede adquirir valores comprendidos entre -1 y 1, donde el valor de -1 corresponde a la presencia de ríos, lagunas, nubes; el valor de 0 corresponde a suelo completamente desnudo, sin vegetación; y el valor de 1 a suelo con una cubierta de biomasa máxima (Esparza, 2013). Índice propuesto por Rouse et al (1974, citado en Aguilar, 2016: 96), según la expresión (1).

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad (1)$$

Donde:

NIR: reflectancia del infrarrojo cercano

RED: reflectancia del rojo

b. Índice de Suelo Desnudo (BSI)

Es un indicador numérico que combina bandas espectrales azules, rojas, infrarrojas cercanas e infrarrojas de onda corta para capturar las variaciones del suelo. Estas bandas espectrales se utilizan de manera normalizada. Las bandas de infrarrojos de onda corta y las bandas espectrales rojas se utilizan para cuantificar la composición mineral del suelo, mientras que las bandas azules y las bandas espectrales de infrarrojos cercanos se utilizan para mejorar la presencia de vegetación (GU, 2019). Expresión (2)

$$BSI = \frac{(RED + SWIR) - (NIR + BLUE)}{(RED + SWIR) + (NIR + BLUE)} \quad (2)$$

Donde:

NIR: reflectancia del infrarrojo cercano

RED: reflectancia del rojo

BLUE: reflectancia del azul

SWIR: reflectancia de la onda corta infrarroja

c. Índice de Vegetación Ajustado a la Humedad (MAVI)

Índice adecuado para la recuperación de LAI (Índice del Área Foliar), se expresa como proporciones entre las diferentes bandas espectrales, reduciendo en gran medida el ruido causado por las variaciones topográficas, lo que hace que sea más adecuado para aplicaciones en zona montañosa.

Índice propuesto por Zhu et al (2014), según la expresión (3).

$$MAVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED + SWIR} \quad (3)$$

Donde:

NIR: reflectancia del infrarrojo cercano

RED: reflectancia del rojo

SWIR: reflectancia de la onda corta infrarroja

1.2.5. Aprendizaje Automático (*Machine Learning*)

Aprendizaje automático es una rama de la inteligencia artificial que busca que los ordenadores sean capaces de aprender e inducir conocimiento a partir de los datos. Un método de machine learning es un algoritmo que estima una dependencia, hasta ese momento desconocida, entre las entradas a un sistema (inputs) y sus salidas (outputs) a partir de los datos disponibles. A medida que se descubre esa relación de dependencia, esta se puede utilizar para predecir o estimar los resultados del sistema futuro a partir de los valores de entrada conocidos (Jimeno, 2018).

1.2.5.1. Algoritmos de Aprendizaje Automático

a. Red Neuronal Artificial (NNT)

Una red neuronal artificial (*Network Neural Technology*, NNT), es una forma de sistema de sucesión de información distribuido, donde el aprendizaje está basado en los procesos neuronales que tienen lugar en el cerebro humano. La idea de la red neuronal se inspiró en el desarrollo de realizar un sistema artificial que realizará tareas del mismo modo que un cerebro (neuronas), adquiriendo datos y conocimientos mediante aprendizaje, los mismos que luego son almacenados. Una RNA aprende, memoriza y divulga las diversas relaciones encontradas en los datos (Jimeno, 2018). Es capaz de modelar complejas

relaciones no lineales encontradas en los datos de una cuenca hidrográfica, sin un conocimiento previo y explícito de las características físicas del proceso (Figura 12).

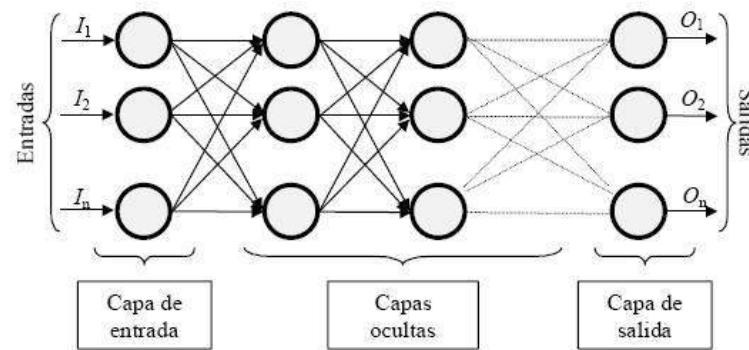


Figura 12: Esquema del algoritmo: Redes Neuronales Artificiales

Fuente: (Shai & Shai, 2014)

b. Bosque aleatorio (RF)

El bosque aleatorio (*Random Forest*, RF) es un algoritmo de aprendizaje supervisado que se utiliza para tareas de clasificación y regresión. Genera buenos resultados la mayor parte del tiempo incluso sin ajuste de hyper-parámetros, es uno de los más actualizados por la simplicidad de su funcionamiento. Para su funcionamiento, Random Forest crea un bosque y lo hace de forma aleatoria. El "bosque" que construye, es un conjunto de árboles de decisión, la mayoría de las veces entrenados con el método de "embolsado". La idea general del método de embolsado es que una combinación de modelos de aprendizaje aumenta el resultado general, obteniendo una predicción más precisa y estable (Anchelia, 2020).

Random Forest agrega aleatoriedad al modelo, mientras crecen los árboles, se busca la mejor característica de entre un conjunto aleatorio. Cada nodo que no tiene hijos es una hoja (Figura 13).

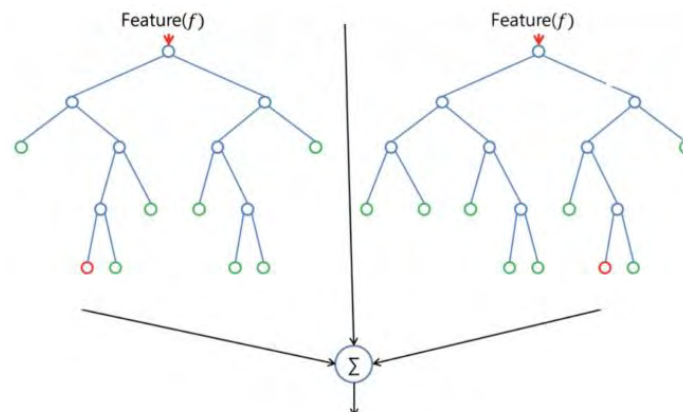


Figura 13: Esquema del algoritmo: Random Forest

Fuente: (Shai & Shai, 2014)

c. Máquinas de Vectores de Soporte (SVM)

Las máquinas de vectores de soporte (*Support Vector Machines*, SVM) son un conjunto de métodos de aprendizaje supervisado que se utilizan para la clasificación, regresión y detección de valores atípicos. SVM realiza un mapeo no lineal de los datos de entrenamiento pasando a un espacio de mayor dimensión, donde se pueda realizar una regresión lineal (Figura 14).

El modelo es eficaz en espacios de alta dimensión, lo que nos permite trabajar con varias características de los objetos, siendo aún efectivo en casos donde el número de dimensiones es mayor que el número de muestras. Utiliza un subconjunto de puntos de entrenamiento en la función de decisión (llamados vectores de soporte), por lo que también es eficiente en memoria. Se caracteriza por ser versátil, puesto que se pueden especificar diferentes funciones del Kernel para la función de decisión tales como: kernel de Lineal, Polinómico, función de base Radial (RBF) y Sigmoide. Se proporcionan núcleos comunes, pero también es posible especificar núcleos personalizados.

En el caso de tener un número de funciones mucho mayor que el número de muestras, se tiene que evitar la adaptación excesiva en la elección de las funciones del núcleo y el término de regularización es crucial para obtener buenos resultados (Tupin et al., 2014).

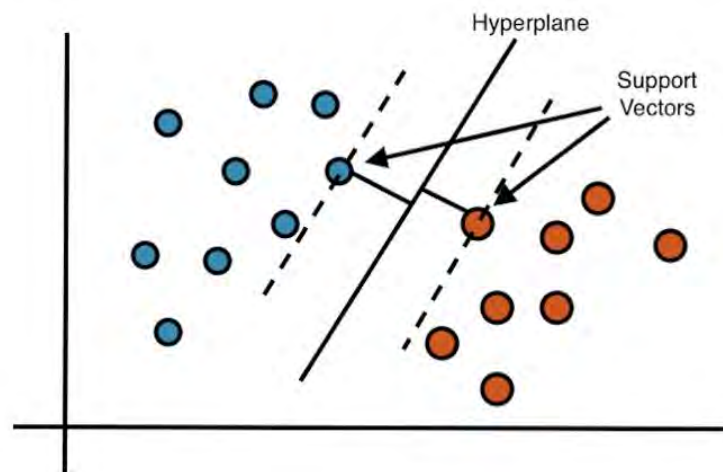


Figura 14: Esquema del modelo: Máquinas de Vectores de Soporte

Fuente: (Shai & Shai, 2014)

CAPÍTULO II: ÁREA DE ESTUDIO

2.1.Ubicación

2.1.1. Ubicación política

Políticamente el valle de la quebrada Arapato se ubica en el distrito de Tamburco, dentro del ámbito de la provincia de Abancay, región de Apurímac (Tabla 6 y Figura 15):

Tabla 6: Ubicación política del área de estudio.

Región	Apurímac
Provincia	Abancay
Distrito	Tamburco

Fuente: elaborado en base a (SERNANP, 2016).

2.1.2. Límites

El valle de la quebrada Arapato, se encuentra limitado con los distritos de San Pedro de Cachora, Huanipaca, Abancay y Curahuasi (Tabla 7).

Tabla 7: Límites del área de estudio.

Norte	Distritos de San Pedro de Cachora y de Huanipaca.
Oeste y sur	Distrito de Abancay.
Este	Distrito de Curahuasi.

Fuente: elaborado en base a (SERNANP, 2016).

2.1.3. Ubicación geográfica

Geográficamente el valle de la quebrada Arapato abarca 346 hectáreas (Tabla 8) y se ubica en la Zona de Amortiguamiento del Santuario Nacional del Ampay, así mismo forma parte de la Mancomunidad Saywite - Choquequirao - Ampay (Baiker, 2011).

La mayor extensión del valle de la quebrada Arapato está dentro de la zona de vida del “Pajonal altoandino de la Puna Húmeda (Baiker, 2011), específicamente dentro del “Páramo muy húmedo Subandino Subtropical” (pmh – SaS), que se distribuye entre los 3900 m. y 4300 m., caracterizada por presentar un clima perhumedo y frío, con una biotemperatura media anual que oscila entre 4.5 °C y 6°C (Aybar y Lavado, 2017).

Según el mapa nacional de ecosistemas del Perú elaborado por el Ministerio del Ambiente, generada a una escala 1:25000, en el área de estudio predomina el pajonal andino de puna húmeda con vegetación predominantemente de gramíneas forrajeras,

conveniente para el pastoreo extensivo, caracterizado por presentar fisiografía de montaña, encontrándose en la ecorregión Puna (MINAM, 2019).

La configuración topográfica va desde suave hasta empinada, existen asociaciones herbáceas, de gramíneas perennes; los géneros dominantes son *Festuca*, *Stipa*, *Calamagrostis*, *Hypochaeris*, *Scirpus* y *Aciachne*. También se diferencian sectores hidromórficos, conocidos como bofedales, así como zonas donde predominan ejemplares de los géneros *Brachyotum* y *Ribes* (GoreApurímac, 2010).

Tabla 8: Información del área de estudio.

Latitud	13°33'52.16" a 13°32'43.68"
Longitud	72°51'56.55" a 72°52'38.76"
Elevación	3689 - 4636 m.
Centroide (UTM)	730229 m - 8500548 m
Sistema	WGS84
Zona	18S
Área	346 ha
Perímetro	10.5 km
Pendiente	26%
Índice de compacidad	1.61

Fuente: elaborado en base a (GoreApurímac, 2010).

2.1.4. Ubicación hidrográfica

Hidrográficamente la quebrada Arapato pertenece a la vertiente del Atlántico, unidad hidrográfica del río Pachachaca (49992), micro cuenca del Río Mariño (499921), más abajo se une al río Colcaque que nace en la laguna de Yanacocha a 4500 m., y junto a otros afluentes como los ríos Yanajaja, Cachimayo, Layanhuayco, Laymijasa y Veronicayoc, drenan sus aguas de norte a sur. para luego unirse al río Mariño en el centro de la ciudad de Abancay (Villacorta et al., 2019).

Tabla 9: Ubicación hidrográfica del área de estudio.

Vertiente	Atlántico
Cuenca	Río Pachachaca
Micro cuenca	Río Mariño
Sub cuenca	Chinchichaca (Ñaccero)

Fuente: elaborado en base a (Villacorta et al., 2019).

2.1.5. Accesibilidad

Para llegar al área de estudio, es de manera terrestre por vía asfaltada, cubriendo la siguiente ruta (Figura 16):

Tabla 10: Accesibilidad al área de estudio.

Tramo 1	Cusco – Abancay	–	Iniciar desde la ciudad del Cusco hacia la ciudad de Abancay (194 km).
Tramo 2	Abancay – Q’orimarca	–	Desde la ciudad de Abancay, iniciar el ascenso hacia el abra Soqlla Qasa (3990 m.), y en adelante empezar el descenso a la cuenca del río Apurímac, hasta llegar al sitio denominado Carbonera (9.5 km más abajo), para tomar el desvío por carretera afirmada y recorrer siete kilómetros hasta llegar a Q’orimarca (3950 m.).
Tramo 3	Q’orimarca – Yuraccasa	–	A partir de Q’orimarca, no se tiene un sendero fijo, pero como indicación general se tiene que subir al abra (4280 m.), donde se distingue un valle estrecho, observándose un paisaje maravilloso y una catarata que alimenta con su caudal a un pequeño bofedal (Baiker, 2011). En este lugar donde se encuentra el bofedal de Yuraccasa, es donde se acondiciona e instala las carpas y demás materiales para realizar el respectivo trabajo de campo en el valle de la quebrada Arapato.
Tramo 4	Yuraccasa – Abancay	-	Para el retorno se sigue la ruta de descenso (6 Km) pasando por la Faccha (catarata), hasta llegar a la comunidad Santiago de K’erapata, desde donde se toma movilidad hasta la ciudad de Abancay.

Fuente: elaborado en base a Baiker (2011).

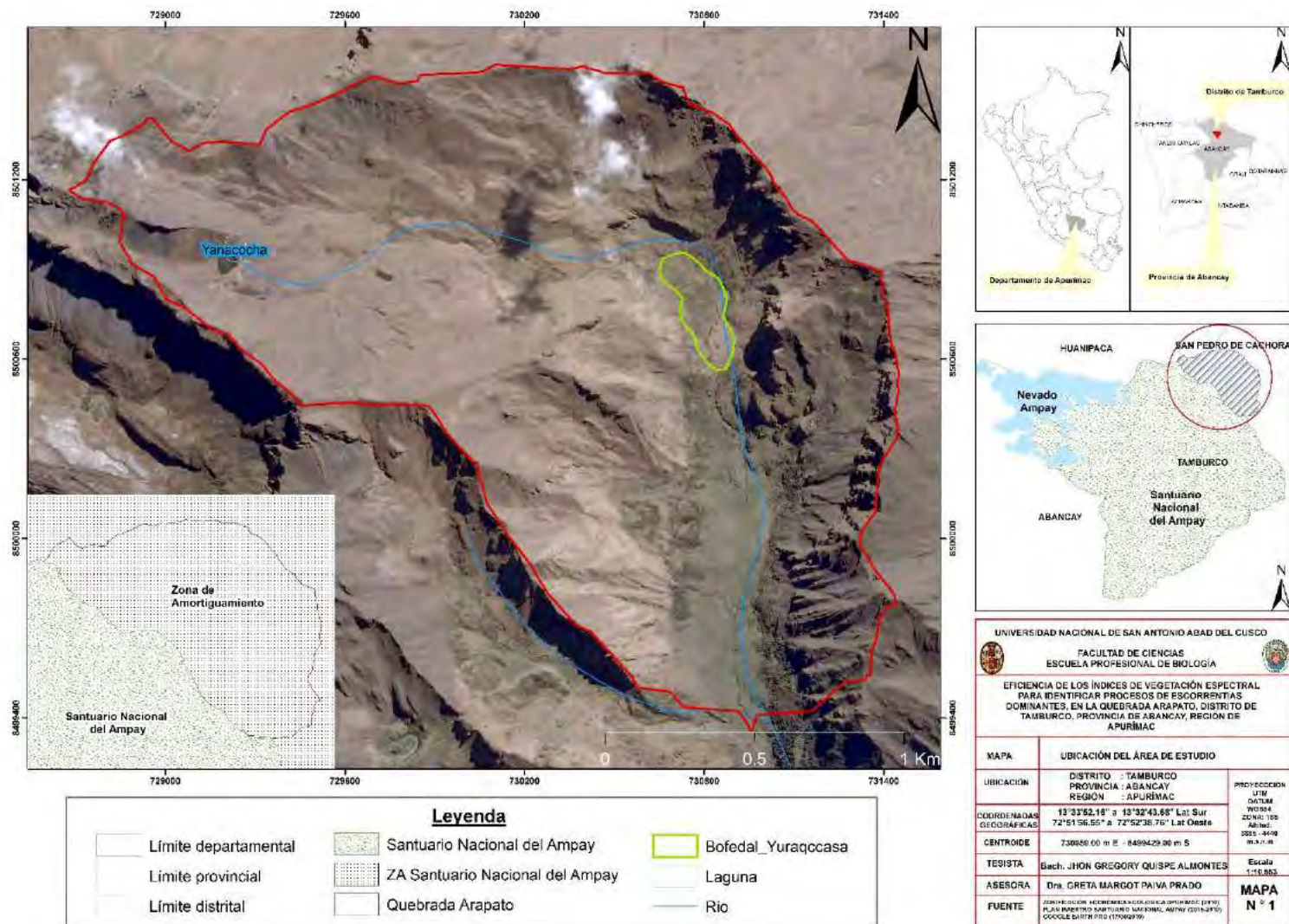


Figura 15: Ubicación política de la zona de estudio.

Fuente: elaborado en base (GoreApurímac, 2010).

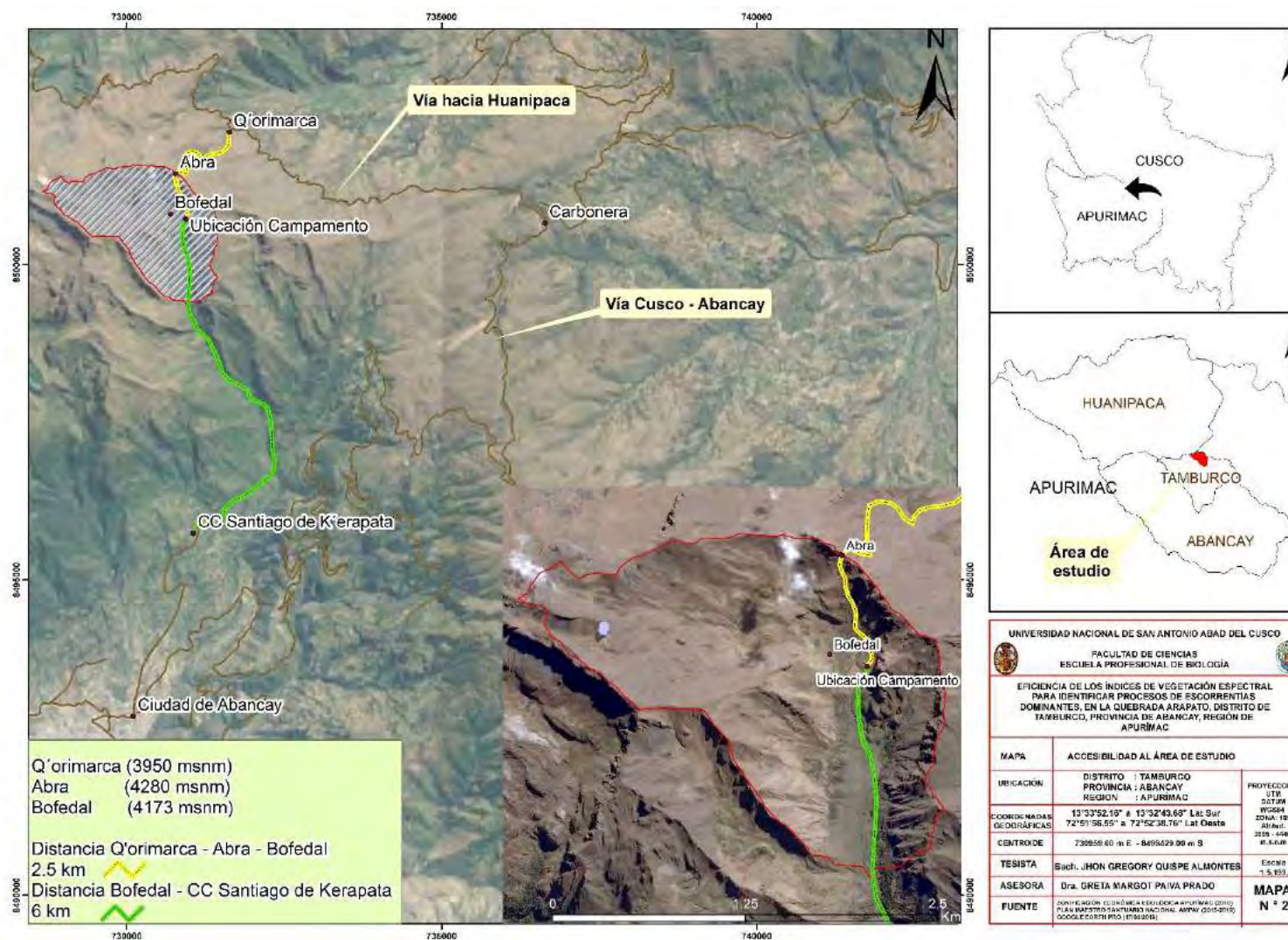


Figura 16: Accesibilidad a la zona de estudio.

Fuente: elaborado en base a Baiker (2011).

2.2. Características de la zona de estudio

2.2.1. Componente físico

a. Relieve

A partir de perturbaciones geodinámicas internas (tectónicas) y externas (intemperismo, erosión, y procesos geodinámicas), la zona de estudio presenta rasgos topográficos propios de la superficie inclinada fluvio – aluvial de Abancay (relieve con inclinación 31 – 45%), característico de una configuración topográfica definida por extensas áreas onduladas con laderas de moderado a fuerte declive, hasta presentar en muchos casos afloramientos rocosos, desfiladeros, crestas en caballete y terrazas naturales, por donde discurren ríos torrentosos de cursos cortos (SERNANP, 2016).

b. Hidrología

El comportamiento volumétrico de las aguas es estacional y tiene mayor caudal durante la época fluvial de enero a marzo (SERNANP, 2016).

En la zona de estudio se identifican los manantiales de cuarta categoría (499921-072) con caudal de 12.5 L/s; quinta categoría (499921-070) y (499921-073) con caudales de 3.4 L/s y 3.2 L/s respectivamente; y de sexta categoría (499921-067), (499921-068), (499921-069), (499921-071) con caudales de 1.8 L/s, 2 L/s, 2.8 L/s, 2 L/s respectivamente (Villacorta et al., 2019).

La zona de estudio se caracteriza por presentar acuíferos fisurados con materiales de calizas grises compactas que se encuentran muy plegados, fracturados y con cierto nivel de karstificación, posibilitando una fuerte infiltración directa por parte de las precipitaciones, permitiendo así la recarga del acuífero (Villacorta et al., 2019).

c. Geología

La zona de estudio es un componente aislado de la cordillera del Vilcabamba que se formó con el levantamiento de los Andes correspondiente a la era del Cenozoico y al periodo del Pleistoceno. La unidad geológica a la que pertenece es el grupo Copacabana, característico por presentar suelos kársticos, constituido en la parte inferior por afloramientos de calizas en estratos gruesos intercaladas con lutitas negras y areniscas de grano fino, y en la parte superior con presencia de lutitas negras deleznales, con presencia de grandes nódulos calcáreos de 20 a 30 cm de diámetro, intercalados con areniscas feldespáticas de grano medio a fino de color gris, cortados por diques andesíticos (Villacorta et al., 2019).

d. Geomorfología

La unidad geomorfológica correspondiente a la zona de estudio corresponde a Montaña modelada en roca sedimentaria, que se caracteriza por presentar fuertes pendientes (entre 30° a 45°) y un recubrimiento de material entre coluvial y morrénico en el ex nevado Ampay (Villacorta et al., 2019).

e. Edafología

Presenta suelos de horizonte oscuro muy ricos en materia orgánica con cobertura de gramíneas, propios de piso andino o puna, cumpliendo un rol importante al brindar el servicio ecosistémico que es el de ser sumideros de carbono (Manta, 2008). A medida que se extiende hacia las partes altas, se aprecian suelos pedregosos y abruptos de roquedales y peñascos acompañados de lutitas; los suelos de las praderas y vegetación de esta parte soportan drásticos cambios climáticos, bajas temperaturas en las noches y soleadas durante el día. Debido al frágil ecosistema vegetal los suelos y la cobertura gramínea se desecan rápidamente durante el periodo de estío, en cambio durante los meses lluviosos el paisaje luce como alfombra cespitosa de suelo húmedo, con abundantes nieblas y nubosidad (SERNANP, 2016).

f. Clima

Según el mapa climático del Perú elaborado por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología – SENAMHI, la zona de estudio presenta un clima lluvioso semifrío con deficiencia de lluvias en otoño e invierno.

A partir de la data obtenida de la estación automática de la “Granja San Antonio”, ubicada en el distrito de Tamburco a 2804 m., La precipitación anual es de 1038.1 mm/año, diferenciando dos estaciones bien marcadas, un periodo lluvioso de noviembre a marzo con bastante nubosidad y con fuertes precipitaciones en los meses de enero y febrero, con 209.1 y 210.7 mm respectivamente; mientras que el periodo de estiaje presenta lluvias escasas, de abril a octubre, siendo muy poca la precipitación en los meses de junio y julio con 8.2 y 9.7 mm respectivamente (Tabla 7).

La temperatura media anual es de 12.4°C, característico de un clima semifrío de puna, siendo los meses más fríos junio y julio (Tabla 11).

Tabla 11: Datos meteorológicos de la estación Granja San Antonio.

Datos Meteorológicos de la estación: Granja San Antonio, Tamburco (2804 m.)		
[2009-2019]	Temperatura promedio (°C)	Precipitación promedio (mm)
Enero	12.9	209.1
Febrero	12.6	210.7
Marzo	12.5	145.8
Abril	12.6	66.2
Mayo	11.9	24.2
Junio	10.8	8.2
Julio	10.6	9.7
Agosto	11.3	18.3
Setiembre	12.9	16.1
Octubre	13.7	62.1
Noviembre	13.5	99.6
Diciembre	13.1	168.1
Temperatura promedio (°C)	12.4	
Precipitación total (mm)		1038.1

Fuente: elaborado en base a los datos del SENAMHI de su estación meteorológica automática, en San Antonio, Tamburco, Abancay.

El climatodiagrama de la estación de San Antonio, ubicado a 2804 m., en el distrito de tamburco, muestra que la variación climática de acuerdo a las estaciones del año evidencia ausencia de lluvias y mayor incidencia de rayos solares entre los meses de mayo a setiembre, siendo el clima frígido entre los meses de junio a setiembre debido a las bajas temperaturas; a partir del mes de noviembre se inician las primeras lluvias moderando la temperatura y a su vez aumentando las neblinas en el área dominado por pajonales (Figura 17).

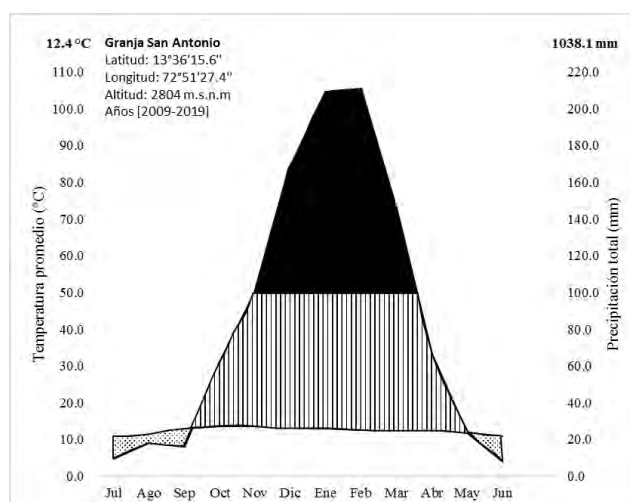


Figura 17: Climatodiagrama de la zona de estudio.

Fuente: Elaborado en base a datos de la Tabla 11.

2.2.2. Componente biológico

a. Flora

Según el mapa de clasificación de unidades de vegetación y uso de suelo, la zona de estudio se caracteriza por la presencia de pajonal altoandino, y debido a la gradiente altitudinal delimita con el borde de bosque, siendo común encontrar especies botánicas propias de pajonal, matorral y bofedal (Tabla 12):

Tabla 12: Flora dentro de la zona de estudio.

Familia	Especie	Nombre común
Apiaceae	<i>Lilaeopsis macloviana</i>	
Apiaceae	<i>Azorella multifida</i>	
Apiaceae	<i>Azorella biloba</i>	
Asteraceae	<i>Barnadesia horrida</i>	Llaulli
Asteraceae	<i>Baccharis</i> sp	
Asteraceae	<i>Bidens triplinervia</i>	
Asteraceae	<i>Cotula mexicana</i>	
Asteraceae	<i>Hypochaeris taraxacoides</i>	Jalla pilli pilli
Asteraceae	<i>Senecio breviscapus</i>	
Brassicaceae	<i>Nasturtium officinale</i>	
Caryophyllaceae	<i>Cerastium mollissimum</i>	
Fabaceae	<i>Lupinus</i> sp	Sachaqéra
Fabaceae	<i>Astragalus uniflorus</i>	
Fabaceae	<i>Trifolium amabile</i>	
Gentianaceae	<i>Gentiana sedifolia</i>	Pencali
Geraniaceae	<i>Geranium sessiliflorum</i>	
Geraniaceae	<i>Erodium cicutarium</i>	
Loasaceae	<i>Cajophora</i> sp	Orqo quisa
Melastomataceae	<i>Brachyotum naudinii</i>	
Plantaginaceae	<i>Veronica anagallis</i>	
Plantaginaceae	<i>Plantago rigida</i>	
Onagraceae	<i>Epilobium denticulatum</i>	
Onagraceae	<i>Oenothera multicaulis</i>	
Orobanchaceae	<i>Bartsia diffusa</i>	
Poaceae	<i>Festuca orthophylla</i>	
Poaceae	<i>Calamagrostis rigescens</i>	
Poaceae	<i>Calamagrostis eminens</i>	
Poaceae	<i>Muhlenbergia fastigiata</i>	
Polygonaceae	<i>Muehlenbeckia vulcanica</i>	
Ranunculaceae	<i>Oreithales integrifolia</i>	
Ranunculaceae	<i>Ranunculus preamorsus</i>	Ch'apu
Rosaceae	<i>Acaena ovalifolia</i>	
Rosaceae	<i>Lachemilla diplophylla</i>	
Rubiaceae	<i>Galium aparine</i>	
Violaceae	<i>Viola pygmaea</i>	Violeta andina

Fuente: (Conza, 2020)

b. Fauna

Según el Diagnostico del Plan Maestro del Santuario Nacional del Ampay (2016) y la guía de aves del Santuario Nacional del Ampay (Valenzuela, 2016), el área de estudio ubicado en la zona de amortiguamiento, alberga numerosas especies de fauna entre las que destacan las siguientes (Tabla 13):

Tabla 13: Fauna de la zona de estudio.

Familia	Especie	Nombre común
Mamíferos		
Caviidae	<i>Cavia tschudii</i>	Poronccoe
Canidae	<i>Licalopex culpaeus</i>	Zorro
Chinchillidae	<i>Lagidium peruvianum</i>	Vizcacha
Cervidae	<i>Odocoileus virginianus</i>	Luichu
Cervidae	<i>Hippocamelus antisensis</i>	Taruca
Felidae	<i>Felis concolor</i>	Puma
Aves		
Anatidae	<i>Oressochen melanopterus</i>	Huallata
Accipitridae	<i>Geranoaetus polyosoma</i>	Aguilucho variable
Charadriidae	<i>Vanellus resplendens</i>	Ave fría andina
Cathartidae	<i>Vultur gryphus</i>	Condor
Furnariidae	<i>Cinclodes albidiventris</i>	Churrete de ala crema
Furnariidae	<i>Synallaxis courseni</i>	
Picidae	<i>Colaptes rupicola</i>	Carpintero andino
Tinamidae	<i>Nothoprocta pentlandii</i>	Perdiz andina
Threskiornithidae	<i>Plegadis ridgwayi</i>	Ibis de la puna
Trochilidae	<i>Colibri coruscans</i>	Siwar k'ente
Trochilidae	<i>Oreotrochilus estella</i>	
Reptiles		
Colubridae	<i>Tachymenis peruviana</i>	Serpiente andina
Anfibios		
Hemiphractidae	<i>Gastrotheca ochoai</i>	

Fuente: (SERNANP, 2016; Valenzuela, 2016).

2.3.Principales amenazas en la zona de estudio

Las amenazas con mayor recurrencia son los incendios provocados en pastizales de manera negligente, con la intención de ampliar la frontera agrícola y la quema de rastrojos como técnica para mejorar el rebrote de pastos. Son costumbres bastante extendidas y de bajo costo en las comunidades del valle de la quebrada Arapato y de los alrededores del Santuario Nacional del Ampay. Los incendios reducen el hábitat, afectando a la

composición florística y faunística del ecosistema, y a los servicios ecosistémicos (sumidero de grandes cantidades de carbono y retención de recurso hídrico), generando procesos acelerados de erosión que afectan los procesos de escorrentías e infiltraciones naturales (Manta, 2008).

Por otro lado, también es recurrente el sobrepastoreo en la zona, siendo vital su control por medio de técnicas adecuadas de pastoreo, puesto que en gran medida estas prácticas afectan la sucesión natural de los ecosistemas andinos, produciendo junto a los incendios la desertificación.

CAPÍTULO III: MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Materiales

3.1.1. Material Biológico

- Muestras botánicas

3.1.2. Materiales y equipos de campo

a. Colectas botánicas

- Libretas de campo
- Etiquetas de campo
- Cinta fliying
- Cordel
- Cuadrante parcelador 1m x 1 m
- Estacas o listones de madera 1.5 m
- Tijera botánica de podar
- Wincha de 50 m
- Bolsas de polietileno
- Papel periódico
- Alcohol al 76 %
- Brújula Sunto

b. Colectas de suelos

- Barreno de metal (profundidad 2 m)
- Pala
- Pico
- Guantes de cuero
- Bolsas ziplock de colecta
- Plumones Sharpie

c. Simulación de escorrentía e infiltración

- Rociador graduado con un temporizador Truper.
- Área circular de 1m² (bidón de agua adaptado).
- Colector metálico de escorrentía adaptado a una probeta de 1000 ml.
- Infiltrómetro de doble anillo (D1: 30cm, D2:20cm, H:30cm).
- Mini Infiltrómetro de disco modelo Meter
- Tubo de observación para agua subterránea (tubo PVC adaptado)

- Cronometro Liveup sport
- Metro Truper Prolock 5m 16''
- Silbato de pozo de acero inoxidable
- Jarras dosificadoras de 1 litro
- Balde de 5 y 20 litros
- Regla metálica milimetrada
- Martillo
- Nivel

d. Equipos de campo

- Sensor de humedad HH2 Moisture Meter Kit, Delta – T Devices Ltd
- Termómetro electrónico Hanna Instruments Checktemp.
- GPS Oregon750t Garmin
- Cámara fotográfica digital Canon

3.1.3. Materiales y equipos de gabinete

a. Materiales de gabinete

- Imágen satelital Sentinel 2B (2019/07/12)
- Software de Sistemas de Información Geográfica (ArcGis 10.5, Qgis 3.10.1, SNAP, R)
- Software Google Earth Pro
- Patrones y claves de identificación de suelos y vegetación
- Lupas rectificadas de aumento
- Envases de papel aluminio
- Bolsas de papel kraf #4, #6
- Batería de tamices Prüfsiebring A TGL 7354

b. Equipos de gabinete

- Laptop Toshiba core i5
- Estufa marca Memmet Typ BM 200
- Horno mufla de 500°C
- Ph de mesa Thermo Scientific Orion Versa Star Pro
- Balanza analítica de campo

3.2. Metodología

3.2.1. Tipo y nivel de la investigación

La presente investigación es de tipo aplicado, cuyo nivel de la investigación es descriptivo, con enfoque cuantitativo de corte longitudinal desarrollado en un año hidrológico.

3.2.2. Técnicas de selección de muestra

La presente investigación evaluó 30 puntos, siguiendo el criterio de escogencia del tamaño de la muestra acorde con el tiempo y recursos disponibles (Hernández & Mendoza, 2018).

La selección de los 30 puntos, se realizó a partir de un muestreo no probabilístico de tipo intencional por criterio, de tal manera que la ubicación de los puntos de muestreo para la investigación fueron escogidos en base a criterios y experiencia previa del investigador (Hernández & Mendoza, 2018).

Por lo tanto, para la ubicación de la muestra, se plantearon algunas características especiales como la representatividad, para una adecuada colecta de vegetación y suelos, y su posterior evaluación, así mismo, se escogió espacios cercanos a fuentes de agua y de fácil accesibilidad para realizar las pruebas de infiltración y escorrentía.

3.2.3. Técnicas de recolección de información

La presente investigación se dividió en tres fases (Figura 18); la primera fase fue de pre campo delimitando el área de estudio para la fase de campo, lo siguiente consistió en identificar in situ a partir de un procedimiento manual estandarizado procesos de escorrentías dominantes, evaluando parámetros de vegetación, suelos, procesos de infiltración, escorrentía y nivel de agua subterránea, siguiendo el proceso del esquema de decisión planteado por Scherrer y Naef (2003), la tercera fase se dio en gabinete, donde se identificó el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), Índice de Suelo Desnudo (BSI), e Índice de Vegetación Ajustado a la Humedad (MAVI) derivados de una imagen satelital Sentinel 2B.

La fase de campo fue realizada entre los meses de agosto a octubre del 2019 (época de secas), y la obtención de la imagen satelital Sentinel 2b, fue en el mes de julio del 2019.

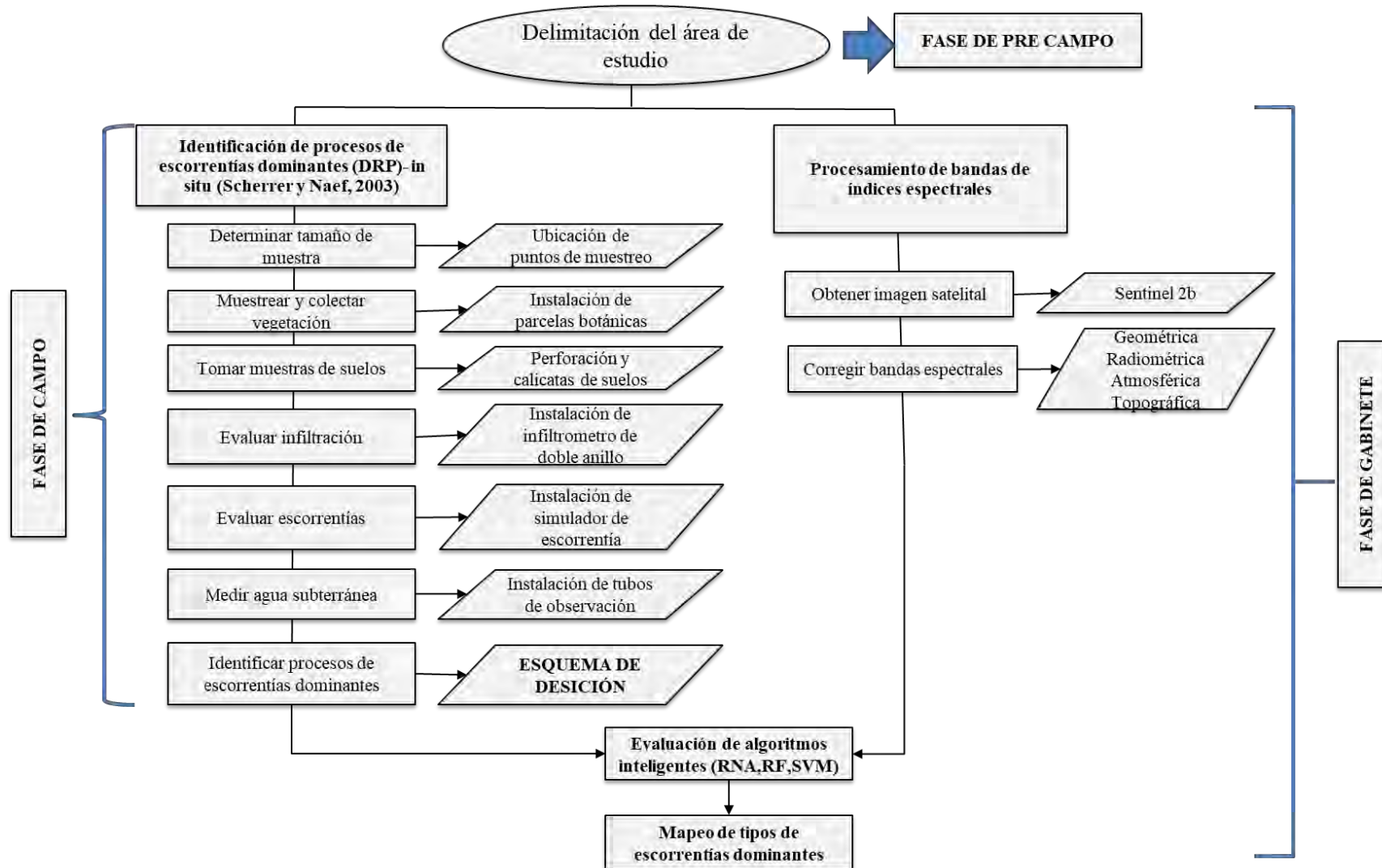


Figura 18: Flujograma del proceso de investigación.

Nota: DRP = Procesos de Escorrentías Dominantes; RNA = Redes Neuronales; RF= Bosque aleatorio; SVM= Soporte Máquina Vector.

Fuente: elaboración propia.

3.2.4. Métodos

3.2.4.1. Delimitación del área de estudio

La delimitación del área de estudio se realizó a partir de un modelo de elevación digital de 12.5 metros en formato GEOTIFF, obtenido de la página web del satélite Alos Palsar de la agencia japonesa, y mediante el software ArcGis 10.5.

El procedimiento según la Autoridad Nacional del Agua (ANA, 2012), fue el siguiente:

- Corrección del modelo de elevación digital.
- Generación de dirección de flujos a partir de una cota mayor y una cota menor.
- Acumulación de flujos mayores para determinar cauces grandes.
- Delimitación de cuencas.
- Definición de red hídrica.

3.2.4.2. Identificación de los tipos de Escorrentías Dominantes a partir de un procedimiento manual estandarizado en campo.

Se siguió el método propuesto por Scherrer y Naef (2003), que a partir de un trabajo minucioso de campo identifican parámetros de vegetación, suelos, procesos de infiltración, escorrentía, y niveles de agua subterránea, para desarrollar esquemas de decisión que permite identificar procesos de escorrentías dominantes siendo estos clasificados en superficiales, subterráneos y por percolación, obtenidos después de eventos de precipitaciones intensas.

Se identificaron treinta (30) puntos de muestreo, y en cada punto según sea el caso se instaló tres (3) parcelas de 1 m² para la colecta e identificación de la vegetación herbácea, o una (1) parcela de 25 m² para la colecta e identificación de la vegetación arbustiva; un (1) cuadrante para la toma y evaluación de suelos; un (1) infiltrómetro de doble anillo para realizar pruebas de infiltración; un (1) simulador de escorrentía (rociador y aro de área circular con colector incluido) para realizar pruebas de escorrentía, y un (1) tubo de observación para medir el nivel de agua subterránea.

El procedimiento manual se realizó en el valle de la quebrada Arapato (346 ha) haciendo uso de las siguientes técnicas.

3.2.4.2.1. Medida de la cobertura vegetal

Para el estrato herbáceo, se instaló parcelas mediante el método del cuadrado, recomendado para estudios a nivel de comunidades herbáceas (Montenegro, 2018). El cuadrante de dimensiones 1 m x 1 m, fue diseñado de un marco de tubo PVC, dividido a su vez en cuadrados de 20 cm x 20 cm (separación cada 20 cm), el cual fue transportable para la evaluación de los diferentes puntos (Figura 19).

El procedimiento consistió en arrojar el cuadrante en una zona representativa del paisaje y en el lugar donde cayó, se colectó muestras botánicas de cada división, considerando tipo de especie y cobertura relativa. Para el estrato herbáceo, dada la complejidad de la distribución de su población y la dificultad de su registro en forma, se procedió a medir el área en términos de porcentaje que ocupa la proyección horizontal del cuerpo de cada planta o grupo de plantas de cada especie en relación a la superficie total de la unidad muestral (Montenegro, 2018).

Para el estrato arbustivo, se instaló parcelas de 5 m x 5 m (Matteucci y Colma, 1982), para la cobertura se consideró a todas las plantas cuya copa se encontraba dentro de la parcela, aun si su tronco estuviese fuera. Así mismo, la cobertura fue calculada de forma individual para cada planta mediante el método de diámetro de copa (Mueller y Ellenberg, 1974), el cual consiste en la medición del diámetro mayor y de su perpendicular (D1 y D2), siendo luego reemplazadas en la expresión (4):

$$Cobertura = \frac{(D1 + D2)^2}{16} * \pi \quad (4)$$

Donde:

D1: Diámetro mayor

D2: Diámetro menor

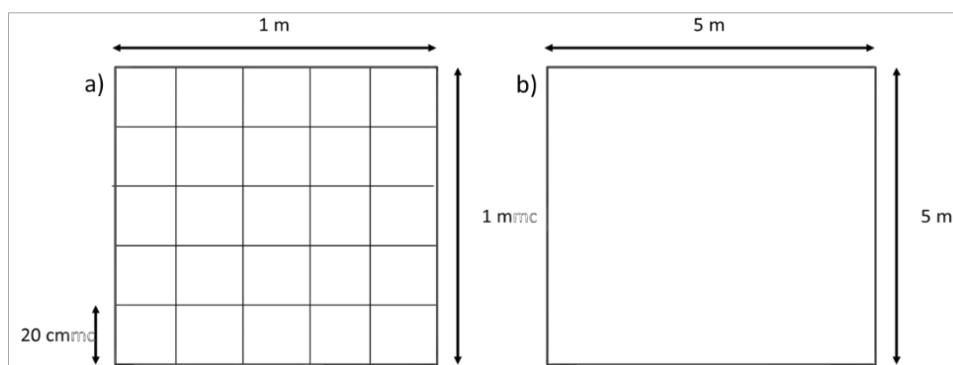


Figura 19: Parcelas botánicas para colecta y evaluación de la vegetación.

Fuente: elaborado en base a (Montenegro, 2018; Mueller y Ellenberg, 1974).

Determinación de muestras botánicas

La identificación de la vegetación, se realizó en el Herbario Vargas de la Escuela Profesional de Biología, de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, Adicionalmente, se apoyó en la consulta de herbarios virtuales (Tropical Home, Missouri Botanical Garden, Atrium).

3.2.4.2.2. Toma de muestras de suelos

Se tomó el área de un cuadrado para muestras superficiales (Figura 20) a diferentes profundidades (25, 50, 75, 100 cm), y con ayuda de una barrena que posee un cilindro metálico de volumen conocido, se extrajeron muestras de suelo, mediante el método adaptado de comprobación (MINAM, 2014), donde el número de muestras y distribución, fue de una muestra de en cada esquina (total 4 muestras) y una en el medio (total 1 muestra), sumando en total 5 muestras, la cual se homogenizó y se extrajo una muestra de 1 kg para cada profundidad, que fue llevado y analizado en el laboratorio.

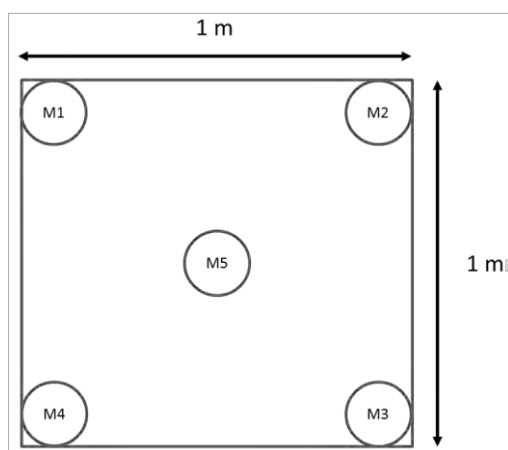


Figura 20: Parcela para toma y evaluación de muestras de suelos.

Fuente: Elaborado en base a (MINAM, 2014).

Parámetros de muestras de suelos evaluados en campo

a. Macroporosidad

La densidad de macroporos se evaluó contando el número de macroporos en secciones transversales horizontales (25cm x 25 cm) en la superficie y a profundidades de 25 y 50 cm (Figura 21), diferenciando a los macroporos pequeños de los grandes, cuando estos son menores a 5 mm de diámetro (Schmocker, 2004).

La continuidad de los poros y la interacción con la matriz del suelo se complementó, con las pruebas de infiltración y escorrentía, utilizando tinta azul (anilina natural), en un periodo de una hora y con una intensidad simulada de 30 mm/hora (Schmocker, 2004).

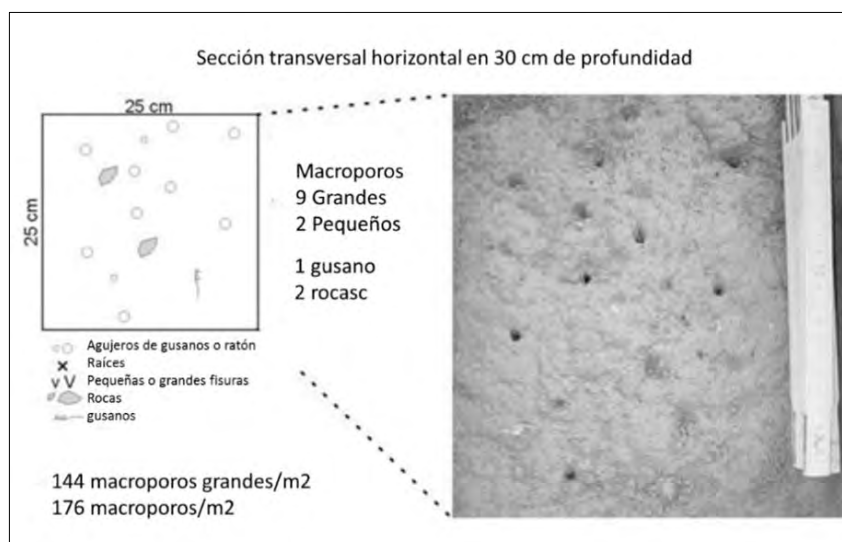


Figura 21: Sección transversal horizontal para cuantificar macroporosidad

Fuente: Schmocker (2004: 23, traducida).

Adicionalmente se determinó el porcentaje de porosidad (expresión 5) de los suelos, que para valores entre 40 % y 60 % indica que existe una correcta aireación y retención de agua (USDA, 1999), previamente, fue necesario conocer el valor de la densidad aparente (expresión 6 y 7), para las profundidades estudiadas (González et al., 2012).

$$n = \left(1 - \frac{pd}{pr}\right) * 100 \quad (5)$$

Donde:

n: porosidad (%)

pd: densidad aparente

pr: densidad real (2.65 g/cm³)

b. Sellado de la superficie del suelo.

Se utilizó el método del tamiz mojado, que consistió en coger una muestra mojada de la superficie del suelo, para posteriormente tamizarlo y separar solo los agregados mayores a 2 mm de diámetro, posteriormente se remojó los agregados y mediante un cronómetro se midió el tiempo de desintegración. Considerando agregados muy estables cuando la muestra no se desintegra, y agregados inestables cuando sí se desintegran rápidamente (Schmocker, 2004).

c. Hidrofobicidad del suelo

Se utilizó la prueba de tiempo de penetración de una gota de agua (Tabla 14), el cual consiste en dejar caer una gota de agua sobre la superficie del suelo y controlar el tiempo hasta que se registre la penetración completa de la gota de agua (Schmocker, 2004).

Tabla 14: Clases de repelencia al agua.

Clase	Grado de hidrofobicidad	Tiempo de penetración de una gota de agua (seg)
1	hidrofilico	<5
2	ligeramente hidrofóbico	5-60
3	fuertemente hidrofóbico	60-600
4	muy hidrofóbico	600-3600
5	extremadamente hidrofóbico	>3600

Fuente: Bisdorn et al (1993: 107, traducida).

Parámetros de muestras de suelos analizados en laboratorio

En los laboratorios (C -229) y (C-301), de la Escuela Profesional de Biología, de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, se procesó y analizó las muestras de suelos obtenidos de los 30 puntos evaluados a diferentes profundidades. Los parámetros determinados fueron:

a. Textura de suelo

Las muestras de suelos tomados a diferentes profundidades (25, 50, 75, 100 cm), fueron secadas a 75°C durante 48 horas, utilizando una estufa marca Memmet Typ BM.200; a partir de las muestras secas, posteriormente por el método gravimétrico y granulométrico se determinó el tipo de suelo, dicho procedimiento consistió en tamizar 250 gr de muestra de suelo seco con tamices de acero inoxidable de malla adecuada marca Prüfsiebring A TGL 7354, cuyos valores obtenidos fueron evaluados haciendo uso del triángulo textural KA4 (FAO, 2015).

b. Humedad relativa

A partir 100 gr de muestra de suelo húmedo obtenidos a diferentes profundidades, se procedió a medir el peso inicial, para posteriormente calcinar la muestra en un horno convencional a 105°C durante 24 horas, determinando el peso final. El contenido de agua

del suelo se determinó entre la diferencia del peso inicial y el peso final, multiplicado por 100 % (método gravimétrico).

c. Densidad aparente

Se utilizó el método del cilindro de radio conocido (radio = 5 cm). Las muestras de suelos obtenidas a diferentes profundidades, fueron secadas en una estufa a 105 °C durante 48 horas, obteniendo así el peso seco del suelo proveniente del cilindro (Rugnitz et al., 2009).

El cálculo para determinar la densidad aparente es según la expresión (6):

$$DA = \frac{ms}{V} \quad (6)$$

Donde:

DA: Densidad aparente

ms: Masa del suelo seco (gr)

V: Volumen del cilindro (cm³)

El volumen del cilindro es calculado por medio de la expresión (7):

$$V = \pi * rad^2 * h \quad (7)$$

Donde:

rad: equivale al radio (cm)

h: altura (cm)

d. Permeabilidad de la matriz

La permeabilidad de la matriz se obtuvo en base a las medidas de la textura del suelo, densidad aparente y el uso de una matriz de permeabilidad (Schmocker, 2004) (Figura 22).

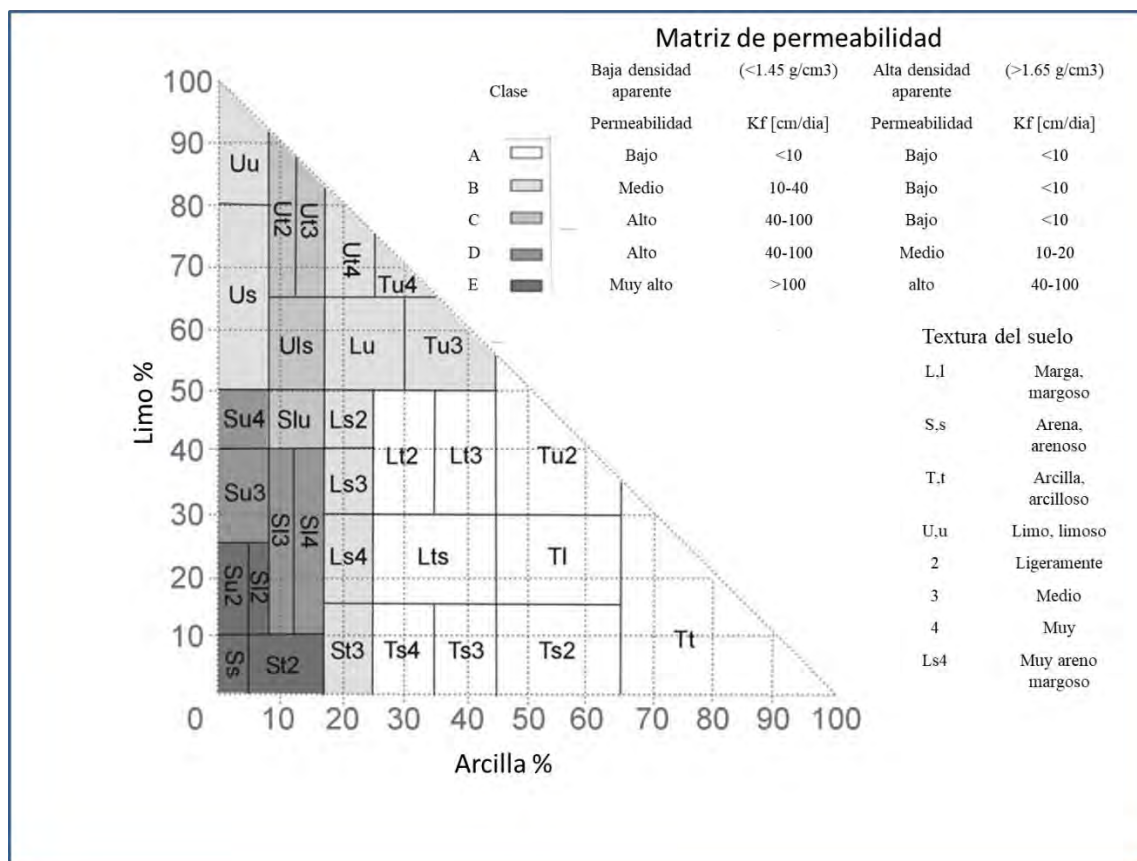


Figura 22: Triángulo textural KA4 y matriz de permeabilidad.

Fuente: Boden (1994; citado en Schmocker, 2004: 20).

e. Compactación del suelo

El grado de compactación del suelo fue calculado a partir de la clasificación de las medidas de la densidad aparente (Tabla 15).

Tabla 15: Clasificación de la densidad aparente y grado de compactación del suelo.

Densidad aparente [g/cm³]	Grado de compactación
<1.25	Muy bajo
1.25-1.45	Bajo
1.45-1.65	Medio
1.65-1.85	Alto
>1.85	Muy alto

Fuente: Boden (1994; citado en Schmocker, 2004: 26).

f. Potencial de hidrogeniones

Para la obtención del ph del suelo se utilizó el método del electrodo, utilizando un medidor de ph marca Thermo Scientific Orion Versa Star Pro. En el proceso inicialmente se calibro el equipo, luego se separo 20 gr de muestra de suelo en un vaso de precipitados,

al cual se le agregó 50 ml de agua destilada (1:2.5), posteriormente se agitó y homogenizó el contenido a intervalos de 1 – 10 minutos; la medición potencio métrica de la actividad de H^+ se realizó por medio de un electrodo calibrado con solución tampón de pH = 7 (Beretta et al., 2015).

g. Materia orgánica

Para la obtención de la materia orgánica se utilizó el método gravimétrico y por ignición, el cual se basa en pesar 50 gr de muestra de suelo que fueron colocados en crisoles resistentes al calor, posteriormente se incineró las muestras en un horno mufla a 500 °C durante 5 horas, obteniendo así el peso final del suelo. El porcentaje de materia orgánica se determinó según la expresión (8):

$$\%MO = \frac{PMO}{PSI} \times 100 \quad (8)$$

Donde:

PMO: Peso de materia orgánica

PSI: Peso de suelo incinerado

3.2.4.2.3. Pruebas de infiltración en campo

Se utilizó un infiltrometro de doble anillo (Figura 23a), también conocido como anillos de Muntz, basado en la perdida de agua a partir de una fuente. La velocidad con la que el agua penetra en el suelo, se mide con base a la profundidad (mm) de la lámina de agua que logra penetrar en el suelo en el tiempo.

La condición de usar dos anillos, es para intentar eliminar el efecto de la expansión lateral del bulbo de humedecimiento bajo el anillo central (Moreno, 2008).

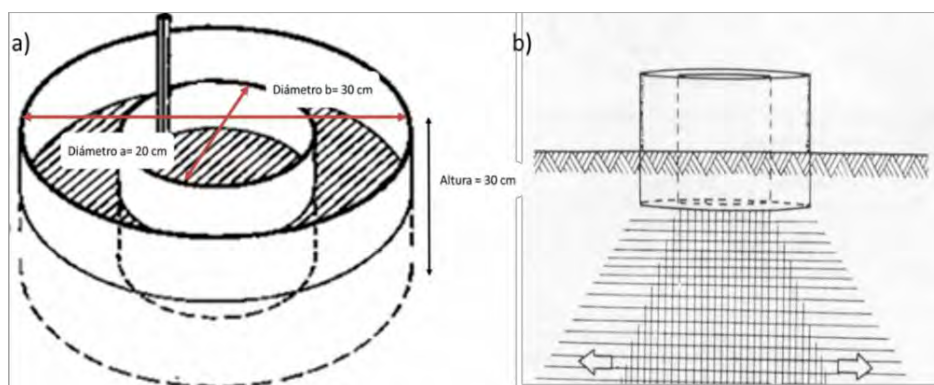


Figura 23: Infiltrometro de doble anillo y proceso de infiltración.

Fuente: Ibañez et al (2012: 5).

Evitando la alteración del suelo y a una profundidad de 5 cm, se instaló un infiltrómetro de doble anillo de diámetros diferentes (diámetro a = 20 cm, diámetro b = 30 cm) y altura de 30 cm (Figura 23b). La idea de colocar los dos anillos es obtener la situación de saturación mediante la tasa de infiltración en (mm/h), para dicho propósito la diferencia entre los niveles máximos y mínimos del agua en ambos anillos, no debe de superar los 10 cm (Ibañez et al., 2012).

Instalación de los anillos y toma de datos

- Elección de la ubicación de los anillos: de preferencia áreas planas y representativas, que incluya vegetación dominante.
- Colocación, llenado de agua y toma de medidas: nivelar ambos anillos, para proceder a llenar de agua, partir desde una altura iguala cero y evitar que exista una diferencia de agua mayor a 10 cm entre el anillo interno y el externo. La toma de datos se realiza utilizando una regla milimetrada y un cronómetro, hasta que la tasa de infiltración no presente diferencias significativas. Adicionalmente tomar medidas de temperatura y humedad del suelo.

Parámetros calculados a partir de los datos obtenidos en la prueba de infiltración

- Infiltración acumulada: para identificar la lámina acumulada en un tiempo t para el suelo en estudio, desarrollado por Kostiakov (1932, citado por Rodríguez et al., 2008: 65). Se utilizó la expresión (9):

$$d = k \cdot t^m \quad (9)$$

Donde:

d: Infiltración acumulada en el tiempo t (min)

k: constante que depende de la estructura inicial del suelo (en seco)

m: constante que depende de la estabilidad de la estructura del suelo frente al agua, $0 < m < 1$

Para obtener los valores de m y k, se utiliza el método de los mínimos cuadrados, a partir de la ecuación de la recta, expresión (10 y 11):

$$\text{Log } d = \text{Log } K + m \cdot \text{Log } t \quad (10)$$

Donde:

Log d= y = variable dependiente

Log K= b = ordenada en el origen (constante del suelo)

m= a = pendiente de la recta (constante del suelo)

Log t= x = variable independiente

$$m = \frac{\frac{\Sigma(\log t \cdot \log d)}{n} - \frac{\Sigma \log t}{n} \cdot \frac{\Sigma \log d}{n}}{\frac{\Sigma(\log t)^2}{n} - \left(\frac{\Sigma \log t}{n}\right)^2} \quad (11)$$

Donde:

n: número de datos observados

- b. Infiltración básica (Ib): La velocidad de la infiltración se hace constante en el tiempo, osea que el pasaje el agua en el suelo entra en régimen. Los datos fueron reemplazados en la expresión (12):

$$\frac{k * ((m + 1) * k)^{\frac{m-1}{m}}}{0.1} \quad (12)$$

Donde:

Ib: infiltración básica (mm/h)

k: constante que depende de la estructura inicial del suelo (en seco)

m: constante que depende de la estabilidad de la estructura del suelo frente al agua, $0 < m < 1$

3.2.4.2.4. Pruebas de escorrentía en campo

Se utilizó un simulador de lluvia diseñado a partir de una estructura de área circular de 1 m² y una altura de 20 cm (Figura 24), el cual fue instalado en el suelo considerando una profundidad de 10 cm (Schmocker, 2004). Adicionalmente se colocó un rociador a un metro de altura, que simulaba precipitación a una intensidad de 30 mm/hora (relación 30 mm = 30 litros de agua en 1 m², durante un tiempo de 1 hora) y un colector para el agua obtenida por escorrentía.

Instalación del simulador de escorrentía

- Elección de la ubicación de la estructura de área circular, rociador y colector de lluvia: de preferencia en áreas planas, representativas y que incluya vegetación dominante.
- Colocación, llenado de agua y toma de medidas: se simuló la precipitación con intensidades de 30 mm/ hora, y se mide 3 veces hasta que la escorrentía sea constante utilizando una probeta y un cronómetro. Adicionalmente tomar medidas de temperatura y humedad del suelo.

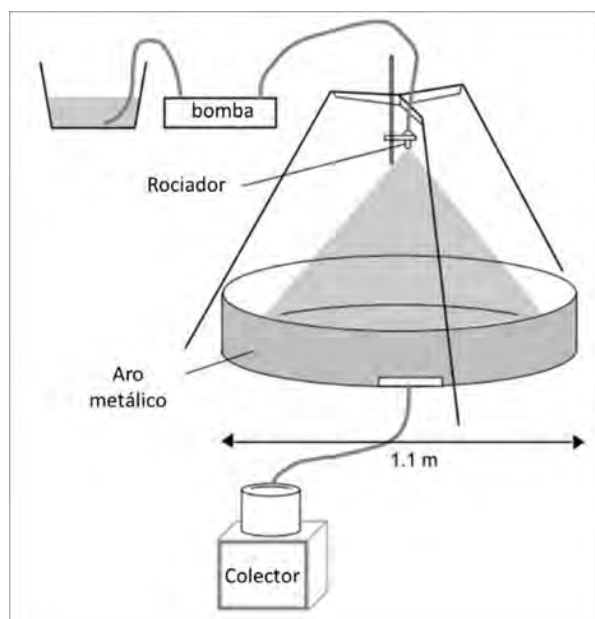


Figura 24: Simulador de escorrentía.

Fuente: Schmocker (2004: 31, traducida).

Parámetros calculados a partir de los datos obtenidos en la prueba de escorrentía

- a. Coeficiente de escorrentía: Se denomina coeficiente de escorrentía a la proporción de precipitación total que pasará a formar parte de la Escorrentía Superficial (lluvia neta) con respecto a la precipitación total.

Para su cálculo se utiliza la expresión (13):

$$C = \frac{Pn}{P} \quad (13)$$

Donde:

Pn: Escorrentía superficial o lluvia neta

P: Precipitación total

3.2.4.2.5. Capacidad de flujo lateral

Las vías de flujo fueron identificadas, a partir de las simulaciones de infiltración y escorrentía, utilizando un trazador (anilina natural) (Tabla 16).

Tabla 16: Tipo de rutas preferenciales para el flujo lateral.

Trayectoria del flujo	Parámetros que indican flujo de rutas preferenciales
Conductos	Superficie cerca de madrigueras de animales. Depresiones causadas por el colapso de conductos erosionados. Suelo con permeabilidad vertical reducida y suelos con infiltración muy preferencial. Bosque con muchos canales de raíces descompuestos.

Horizontes altamente permeables	• Afloramientos geológicos • Lecho de roca con productos de intemperie de grano grueso
Desagüe en lozas (canaletas)	• Sistema de drenaje en planos. • Información del propietario del terreno, • Tapas de ejes, salida de desagües de tejas en río, etc.

Fuente: Schmocker (2004: 33, traducida).

3.2.4.2.6. Medición de agua subterránea

Se utilizó un tubo de observación de PVC de 1 metro, el cual fue ranurado cada centímetro e instalado en suelo perforado del mismo diámetro, cerca al doble anillo de infiltración y el simulador de escorrentía. El procedimiento consistió en medir la altura que alcanza el agua en el suelo vertical considerando un punto determinado (Angelone et al., 2006), apoyado en el uso de una wincha y un silbato de pozo de acero inoxidable.

3.2.4.3. Análisis de los índices espectrales de vegetación y el perfil espectral de los tipos de escorrentías dominantes.

La identificación de los índices de vegetación espectral se realizó a partir de una imagen satelital multispectral correspondiente al satélite Sentinel 2B (19/07/2019). Se identificó el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), Índice de Suelo Desnudo (BSI), e Índice de Vegetación Ajustado a la Humedad (MAVI), en base al principio de vegetación fotosintéticamente activa que expresa cambios en los índices espectrales de vegetación.

3.2.4.3.1. Obtención de imágenes satelitales Sentinel 2B.

Se utilizó la data de precipitación y temperatura (Tabla 11) de la estación meteorológica de la Granja San Antonio, para distinguir los meses con mayor incidencia de lluvias y nubosidad, puesto que para una correcta comparación de los índices analizados es necesario utilizar imágenes limpias; la imagen satelital Sentinel 2b de fecha 19 de julio del 2019 (Figura 25), con un ancho de franja de 290 km, del cuadrante T18LYL, fue obtenida de la página web de la agencia espacial Europea - Copernicus. La imagen fue seleccionada por presentar menor nubosidad (Tabla 17).

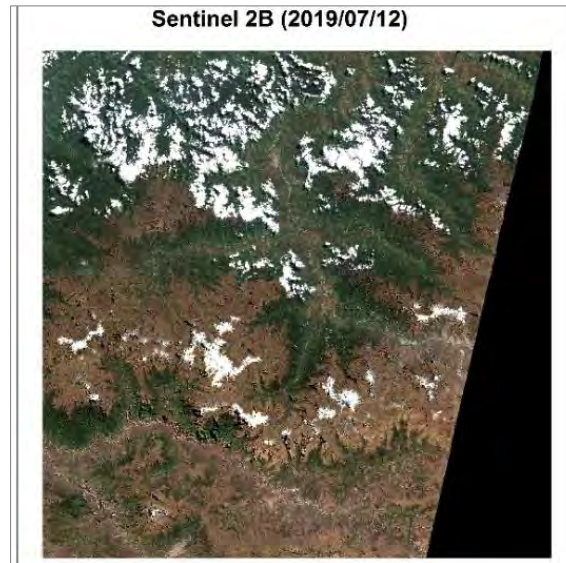


Figura 25: Imagen satelital Sentinel 2B (2019/07/12).

Fuente: <https://www.copernicus.eu/en>, accedida el 10/10/2019.

Tabla 17: Imagen satelital seleccionada para la investigación.

Satelite	Path/Row	Porcentaje de nubosidad	Fecha de la imagen
Sentinel 2B	T18LYL	0%	12/07/2019

Nota: T18LYL= cuadrante de la zona de estudio para el satélite Sentinel 2B.

Fuente: <https://www.copernicus.eu/en>, accedida el 10/10/2019.

3.2.4.3.2. Tratamiento de imagen satelital Sentinel 2B

Se realizó el pre procesamiento de la imagen satelital para evitar distorsiones propias del sensor y la atmosfera, a través de correcciones geométricas, radiométricas, atmosféricas y topográficas (González et al., 2013).

- Corrección geométrica: se aplicó para ortorectificar la imagen mediante el método de “Puntos de control”, a partir de una imagen base (Google Earth Pro) y el software Qgis 3.10.1.
- Corrección radiométrica: se aplicó para tratar los valores de píxel de una imagen satélite para obtener valores de intensidad homogéneos equilibrando histogramas o corrigiendo imperfecciones presentes en los píxeles.
- Corrección atmosférica: se aplicó para eliminar la neblina.
- Corrección topográfica: se aplicó para eliminar las sombras.

En la corrección radiométrica y atmosférica de la imagen satelital Sentinel 2B, se utilizó el complemento de análisis multiespectral Sen2Cor del software SNAP (plataforma de aplicación de Sentinel)(Mueller et al., 2019).

Para la corrección topográfica se utilizó el método de la corrección a partir de la pendiente, mediante la herramienta *topographic correction* del software Qgis 3.10.1, y a partir de la información de la metadata de la imagen seleccionada.

3.2.4.3.3. Extracción de valores de la capa raster

Se construyó cuadrantes de 10m x 10m, para toda la extensión de la zona de estudio (Valle de la quebrada Arapato) en el software ArcGis 10.5 (*Data Management Tools, Features, Feature to Polygon*), a partir del cual se extrajo una máscara (*Spatial Analyst Tools, Extraction, Extract by Mask*) para extraer el valor de los pixeles obtenidos de la capa raster de cada índice de vegetación espectral (Figura 26).

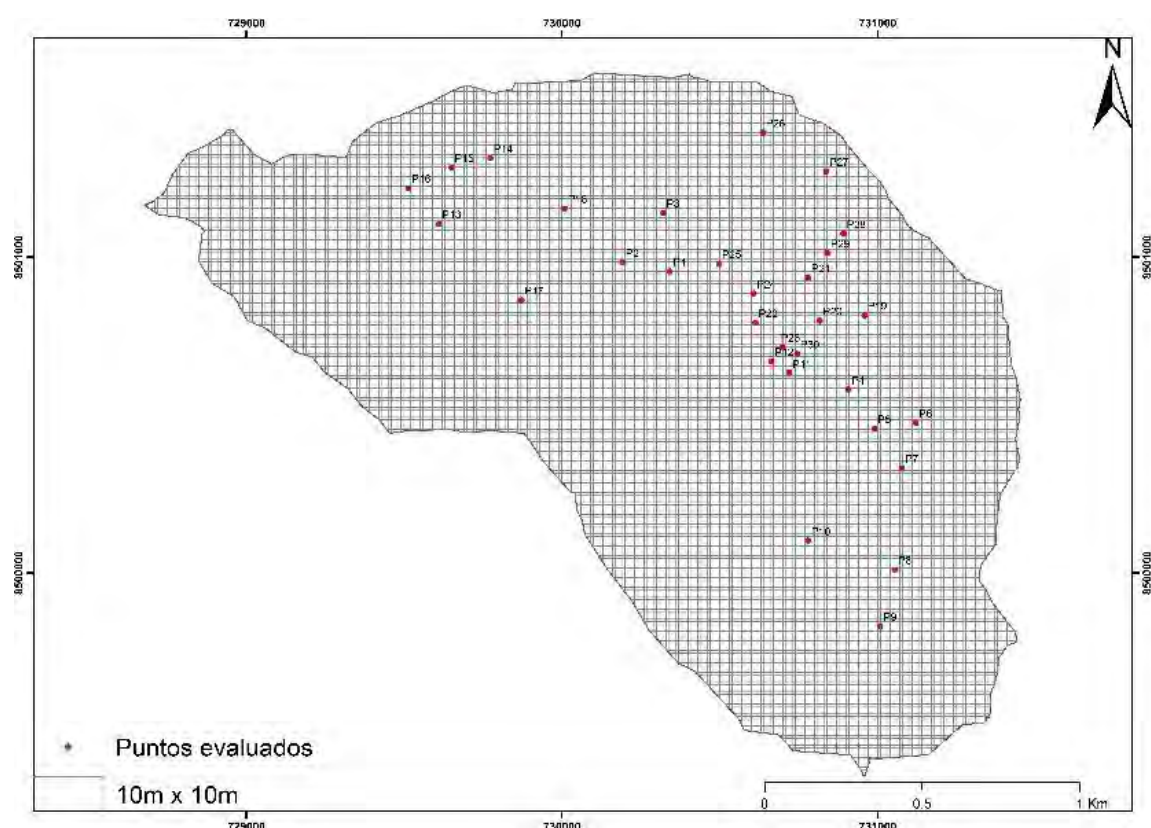


Figura 26: Cuadrícula de 10 m x 10 m y puntos evaluados en campo.

Fuente: elaboración propia.

3.2.4.3.4. Determinación de las bandas de los índices de vegetación espectral

Las bandas de los índices de vegetación espectral del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), Índice de Suelo Desnudo (BSI) e Índice de Vegetación Ajustado a la Humedad (MAVI) derivados de una imagen satelital Sentinel 2B, fueron visualizados en el software ArcGis 10.5 (Tabla 18).

Tabla 18: Bandas utilizadas para el NDVI, BSI y MAVI.

	Banda	NDVI	BSI	MAVI
2	Azul (BLUE)		X	
4	Rojo (RED)	X	X	X
8	Visible e infrarrojo cercano (VNIR)	X	X	X
11	Onda corta infrarroja (SWIR)		X	X

Fuente: Elaborado por el autor.

3.2.4.3.5. Identificación del perfil multiespectral

Utilizando los paquetes `rgdal`, `raster`, `caret` y `sp` dentro del software R, se organizó los valores de reflectancia de todas las bandas de la imagen satelital Sentinel 2B del área de estudio y los datos obtenidos en campo de los procesos de escorrentías dominantes, para identificar el perfil multiespectral a nivel de densidades. Se procedió de la manera siguiente:

Paso 1: Instalar paquetes y cargar librerías

```
install.packages("rgdal", raster, caret, sp)
```

Paso 2: Listar todas las bandas Sentinel-2B del area de estudio

```
list_nm <- list.files('new_data', full.names = TRUE, pattern = '.jp2')
```

Paso 3: Cargar las bandas de la imagen Sentinel-2

```
temp_r <- list()
for(i in 1:length(list_nm)){
  temp_r[[i]] <- raster::raster(list_nm[i])
}
```

Paso 4: Cargar datos obtenidos de campo

```
fieldData = rio::import('data/data_soil.csv')
samples_data <- fieldData[,1:2] # seleccion de coordenadas de cada punto de muestreo
```

Paso 5: Extraer los valores de cada banda

```
list_sd <- list()
for(a in 1:length(temp_r)){
  saa <- raster::extract(temp_r[[a]],samples_data) # Extraer los valor de cada banda
  df_o <- data.frame(Band = saa) # Crear un data frame por cada conjunto de datos
  list_sd[[a]] <- df_o} # Incorporar los datos en una lista de indice a
```

Paso 6: Concantenar valores por columnas

```
dCalldf <- do.call(cbind, list_sd)
```

Paso 7: Renombrar las columnas de las bandas

```
colnames(dCalldf) <- paste0('Band_',1:13)
```

Paso 8: Definir las clases para una mejor visualización

```
classes <- c('Class2', 'Class4', 'Class2', 'Class2', 'Class2', 'Class2', 'Class2', 'Class2', 'Class2',  
'Class2', 'Class3', 'Class2', 'Class2', 'Class2', 'Class2', 'Class1', 'Class4', 'Class3', 'Class2',  
'Class3', 'Class3', 'Class2', 'Class2', 'Class2', 'Class2', 'Class2', 'Class2', 'Class2', 'Class2',  
'Class3')
```

Paso 9: Extraer los puntos de muestreo en una tabla

```
training_points <- data.frame(fieldData[,1:2])
```

Paso 10: Combinar los puntos de muestreo con la tabla de valores de Bandas (Sentinel-2B)

```
df <- data.frame(training_points, dCalldf)
```

Paso 11: Definir un perfil para graficar el espectro multitemporal (Sentinel-2B)

```
profiles <- df %>%  
  as.data.frame() %>% # definir una tabla  
  cbind(., classes) %>% # combinar con las clases definidas  
  na.omit() %>% # eliminar los valores nulos  
  group_by(classes) %>% # agrupar todos los valores en las bandas en cada clase  
  summarise(Band_1 = mean(Band_1), # media de la banda 1  
    Band_2 = mean(Band_2), # media de la banda 2  
    Band_3 = mean(Band_3), # media de la banda 3  
    Band_4 = mean(Band_4), # media de la banda 4  
    Band_5 = mean(Band_5), # media de la banda 5  
    Band_6 = mean(Band_6), # media de la banda 6  
    Band_7 = mean(Band_7), # media de la banda 7  
    Band_8 = mean(Band_8), # media de la banda 8  
    Band_9 = mean(Band_9), # media de la banda 9  
    Band_10 = mean(Band_10), # media de la banda 10  
    Band_11 = mean(Band_11), # media de la banda 11  
    Band_12 = mean(Band_12), # media de la banda 12  
    Band_13 = mean(Band_13)) %>% # media de la banda 13  
  as.data.frame() # Exportar como una tabla
```

Paso 12: Explorar las 4 primeras filas

```
head(profiles)
```

Paso 13: Grafico de perfil multi-espectral (Sentinel-2B)

```
profiles %>%
```

```
select(-classes) %>% # seleccionar todas las bandas excepto la columna `classes`
gather() %>% # reforma de columnas a filas
```

Paso 14: Crear una columna `class` para todos los valores

```
## 13, define el numero de columnas por cada clase
mutate(class = rep(c("Class1", "Class2", "Class3", "Class4"), 13)) %>%
```

Paso 15: Generar un gráfico de todo el conjunto de dato utilizado como grupo y las clases la columna `class`

```
ggplot(data = ., aes(x = fct_relevel(as.factor(key)), y = value, group=class, color = class))
+ geom_point(size = 2.5) + # incorporar puntos
geom_line(lwd = 1.2) + # incorporar lineas
scale_color_manual(values=c("#E74C3C", "#3498DB", "#28B463", "#F1C40F")) +
labs(title = "Perfil Espectral desde imagenes Sentinel-2",
x = "Bandas", y = "Valores de reflectancia") +
```

Paso 16: Configuración de la presentación de la figura

```
theme(panel.background = element_blank(), # Fondo blanco
panel.grid.major = element_line(color = "gray", size = 0.5), # Grid
panel.grid.minor = element_line(color = "gray", size = 0.5), # Grid
axis.ticks = element_blank(),
axis.text.x = element_text(angle = 90, vjust = 0.5, hjust=1)) # Nombres en vertical
```

Paso 17: Gráfico de perfil multi-espectral (Sentinel-2) a nivel de densidades

Lineas verticales representan la media de los valores de reflectanci

```
profiles %>%
select(-classes) %>%
gather() %>%
mutate(class = rep(c("Class1", "Class2", "Class3", "Class4"), 13)) %>%
ggplot(., aes(x=value, group=as.factor(class), fill=as.factor(class))) +
geom_density(alpha = 0.75) +
geom_vline(data = . %>% group_by(class) %>% summarise(grp.mean = mean(value)),
aes(xintercept=grp.mean, color = class), linetype="dashed", size=1) +
scale_fill_manual(values=c("#E74C3C", "#3498DB", "#28B463", "#F1C40F"),
name = "class") +
scale_color_manual(values=c("gray", "#CD853F", "#3CB371", "#33CEFF")) +
theme(panel.background = element_blank(),
panel.grid.major = element_line(color = "gray", size = 0.5),
```

```

panel.grid.minor = element_line(color = "gray", size = 0.5),
axis.ticks = element_blank() +
labs(x = "Valores de reflectancia",
y = "Densidad",
title = "Histograma de densidades del perfil espectral")

```

3.2.4.4. Evaluación de algoritmos inteligentes de clasificación, para el reconocimiento automático de los tipos de escorrentías dominantes.

Se comparó la información de reflectancia de las bandas de los índices espectrales de vegetación, con información obtenida en campo para los procesos de escorrentías dominantes; se utilizó el software R aplicando los siguientes paquetes y/o funciones:

Paso 1: Instalar paquetes y cargar librerías

```
install.packages("nnet, randomForest, kernlab, e1017");
```

Paso 2: Separar los datos en 80% para entrenamiento y 20% para evaluación

```

trainx = list(0)
evalx = list(0)
for (i in 1:4){ # loop a traves de las cuatro clases, [4] define el numero de clases
  cls = samples[samples$class == i,]
  smpl <- floor(0.75 * nrow(cls)) # extraer una muestra del 80%
  tt <- sample(seq_len(nrow(cls)), size = smpl)
  trainx[[i]] <- cls[tt,]
  evalx[[i]] <- cls[-tt,]}

```

Paso 3: Inicio de los modelos de entrenamiento

Entrenamiento del modelo de redes neuronales

```

MoasdlIn <- trn[, (4:ncol(trn)-1)]
nnet_model <- caret::train(x = MoasdlIn, y = as.factor(as.integer(as.factor(trn$class))),
  method = "nnet", metric="Accuracy", trainControl = tc, tuneGrid =
nnet.grid) # metodo `nnet`

```

Entrenamiento del modelo de random forest

```

rf_model <- caret::train(x = MoasdlIn, y = as.factor(as.integer(as.factor(trn$class))),
  method = "rf", metric="Accuracy", trainControl = tc, tuneGrid = rf.grid) #
metodo `rg`

```

Entrenamiento del modelo de support vector machines

```
svm_model <- caret::train(x = MoasdlIn, y = as.factor(as.integer(as.factor(trn$class))),  
                          method = "svmRadialSigma", metric="Accuracy", trainControl = tc,  
                          tuneGrid = svm.grid) # metodo `svm`
```

Paso 4: Convertir los datos de evaluación en datos espaciales para extraer los valores de escorrentía

```
eva.sp = SpatialPointsDataFrame(coords = cbind(eva$x, eva$y), data = eva)
```

Paso 5: Extraer valores para el muestreo

neural network

```
nnet_Eval = raster::extract(nnet_prediction, eva.sp)
```

random forest

```
rf_Eval = raster::extract(rf_prediction, eva.sp)
```

support vector machines

```
svm_Eval = raster::extract((svm_prediction), eva.sp)
```

Paso 6: Crear matriz de confusión

```
nnet_errorM = confusionMatrix(as.factor(nnet_Eval), as.factor(eva$class)) #
```

```
rf_errorM = confusionMatrix(as.factor(rf_Eval), as.factor(eva$class))
```

```
svm_errorM = confusionMatrix(as.factor(svm_Eval), as.factor(eva$class))
```

```
writeRaster(nnet_prediction, 'nnt_algorithm')
```

```
writeRaster(rf_prediction, 'rf_algorithm')
```

```
writeRaster(svm_prediction, 'svm_algorithm')
```

```
nnet_errorM = confusionMatrix(as.factor(nnet_Eval), as.factor(eva$class)) #
```

```
rf_errorM = confusionMatrix(as.factor(rf_Eval), as.factor(eva$class))
```

```
svm_errorM = confusionMatrix(as.factor(svm_Eval), as.factor(eva$class))
```

3.2.4.5. Mapeo de los tipos de escorrentías dominantes de toda la zona de estudio.

A 'partir de los datos de entrenamiento y datos evaluados, se aplicará los modelos para toda el área de estudio, se utilizó el software R aplicando las siguientes funciones:

Paso 1: Preparar Conjunto de raster para la proyeccion

```
s2data <- raster::stack(Band_1, Band_2, Band_3, Band_4, Band_5, Band_6,
```

```
Band_7, Band_8, Band_9, Band_10, Band_11, Band_12, Band_13)
```

```
names(s2data) <- paste0('Band_', 1:13) # renombrar las variables como `Band_1`,  
`Band_2`, etc
```

Paso 2: Aplicar los modelos en los datos.

Aplicar el modelo de redes neuronales a los datos Sentinel-2B.

```
nnet_prediction = raster::predict(s2data, model=nnet_model)
```

Aplicar el modelo random forest a los datos Sentinel-2B.

```
rf_prediction = raster::predict(s2data, model=rf_model)
```

Aplicar el modelo support vector machine a los datos Sentinel-2B.

```
svm_prediction = raster::predict(s2data, model=svm_model)
```

Paso 3: Mostrar mapas

```
plot(nnet_prediction, main='nnt algorithm')
```

```
plot(rf_prediction, main='rf algorithm')
```

```
plot(svm_prediction, main='svm algorithm')
```

CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1. Identificación de los tipos de escorrentías dominantes a partir de un procedimiento manual estandarizado en campo.

En la figura 27, se muestran los 30 puntos evaluados en la zona de estudio, estos fueron ubicados desde los 4006 m. a 4332 m..

4.1.1. Parámetros evaluados para identificar procesos de escorrentías dominantes

Cobertura vegetal

En la tabla 19, se muestra la evaluación de 23 cuadrantes de 1m² y 07 parcelas de 25m², distribuidos en toda la extensión de la zona de estudio.

En los cuadrantes de 1m², el pajonal de puna húmeda, fue la formación más extensa del área de estudio y se encontró frecuentemente en laderas de suave a moderada pendiente.

La altura del pajonal varió entre 0.5 y 1 m aproximadamente, de acuerdo a las especies de gramíneas dominantes (macollos). Los macollos estaban distanciados unos de otros, dejando suelo desnudo o acompañados por diversas especies, excepto en algunas áreas con mayor humedad en donde los macollos llegaron a tener mayor densidad, y los espacios dejados fueron escasos.

En las parcelas de 25m², el matorral se encontró en las partes más bajas del área de estudio (pequeños parches), de pendiente suave, moderada o algo escarpada, de suelo terroso a poco pedregoso. La vegetación tubo moderada a alta densidad, acompañada por una composición menos diversa, en las zonas más altas dentro de esta formación y en las laderas más secas. Los arbustos, presentaban tamaños promedio entre 1.5 o 2 m de alto.

Las familias mejor representadas fueron Asteraceae (17 especies), Rosaceae (8), Poaceae (6), Apiaceae (5), Cyperaceae (4), Ranunculaceae (4). Las especies que presentaron mayor presencia respecto a los demás en los cuadrantes de 1m², fueron *Stipa* sp (30.5%) y *Calamagrostis aff eminens* (30.4%), mientras que en las parcelas de 25 m², fueron *Baccharis sp* (24%) y *Gynoxis sp* (19%).

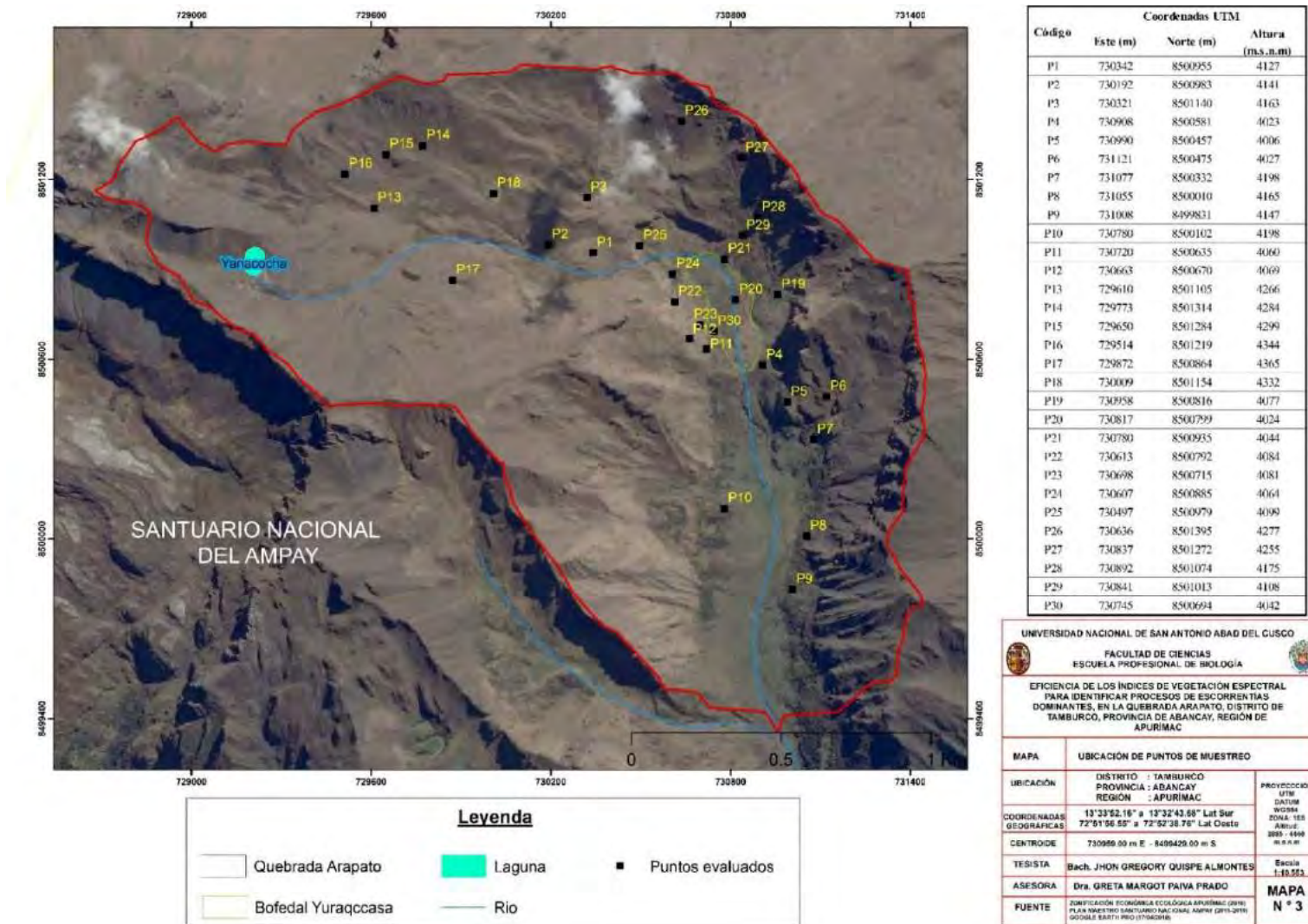


Figura 27: Ubicación de puntos de evaluación en campo.

Fuente: elaboración propia en base a datos colectados en campo.

Tabla 19: Evaluación de la vegetación.

Cód	Especies reportadas	Formación vegetal	Tipo de vegetación	Cobertura de la vegetación (%)
P-1	<i>Oreithales integrifolia</i> , <i>Werneria nubigena</i> , <i>Stipa</i> sp	Herbazal	Pajonal de puna húmeda abierto	58
P-2	<i>Stipa</i> sp	Herbazal	Pajonal de puna húmeda cerrado	64
P-3	<i>Calamagrostis affeminens</i>	Herbazal	Pajonal de puna húmeda abierto	85
P-4	<i>Baccharis</i> sp, <i>Acaena ovalifolia</i> , <i>Senecio peruensis</i> , <i>Cerastium af mollisimun</i>	Matorral	Matorral arbustivo de <i>Baccharis</i>	76
P-5	<i>Baccharis</i> sp, <i>Stipa</i> sp, <i>Cerastium af mollisimun</i> , <i>Marchantia polymorpha</i>	Matorral	Matorral arbustivo de <i>Baccharis</i>	85
P-6	<i>Stipa</i> sp	Herbazal	Pajonal de puna húmeda cerrado	80
P-7	<i>Gynoxys</i> sp, <i>Lachemilla diplofila</i> , <i>Stipa</i> sp, <i>Acaena ovalifolia</i> , <i>Carex pichinchensis</i>	Matorral	Matorral arbustivo de <i>Baccharis</i>	92
P-8	<i>Baccharis</i> sp, <i>Achyrocline alata</i> , <i>Stipa</i> sp, <i>Marchantia polymorpha</i>	Matorral	Matorral arbustivo de <i>Baccharis</i>	66
P-9	<i>Escallonia myrtilloides</i> , <i>Brachyotum naudinii</i> , <i>Jengia</i> sp, <i>Achyrocline alata</i> , <i>Lachemilla diplofila</i>	Matorral	Matorral arbustivo de <i>Baccharis</i>	60
P-10	<i>Brachyotum naudinii</i> , <i>Stipa</i> sp, <i>Asplenium</i> sp	Matorral	Matorral arbustivo de <i>Baccharis</i>	60
P-11	<i>Triquetella</i> sp, <i>Valeriana parvula</i> , <i>Halenia umbellata</i> , <i>Calamagrostis affeminens</i> , <i>Carex pichinchensis</i>	Herbazal	Pajonal de puna húmeda cerrado	72
P-12	<i>Stipa</i> sp	Herbazal	Pajonal de puna húmeda abierto	60
P-13	<i>Calamagrostis affeminens</i> , <i>Alchemilla pinnata</i> , <i>Halenia bella</i>	Herbazal	Pajonal de puna húmeda abierto	78
P-14	<i>Werneria nubigena</i> , <i>Calamagrostis affeminens</i> , <i>Werneria vilosa</i>	Herbazal	Pajonal de puna húmeda abierto	78
P-15	<i>Calamagrostis affeminens</i> , <i>Alchemilla pinnata</i>	Herbazal	Pajonal de puna húmeda abierto	78
P-16	<i>Oreithales integrifolia</i> , <i>Stipa</i> sp	Herbazal	Pajonal de puna húmeda abierto	54
P-17	<i>Calamagrostis affeminens</i>	Herbazal	Pajonal de puna húmeda abierto	78
P-18	<i>Calamagrostis affeminens</i> , <i>Lachemilla diplofila</i> , <i>Hypochaeris taraxacoides</i> , <i>Lobelia remiformis</i>	Herbazal	Pajonal de puna húmeda cerrado	84
P-19	<i>Festuca</i> sp	Herbazal	Pajonal de puna húmeda cerrado	86
P-20	<i>Calamagrostis affeminens</i>	Herbazal	Bofedal	90
P-21	<i>Calamagrostis affeminens</i> , <i>Acaena ovalifolia</i> , <i>Halenia bella</i> , <i>Polytrichum pycnocarpum</i>	Herbazal	Pajonal de puna húmeda cerrado	82
P-22	<i>Calamagrostis affeminens</i> , <i>Laestadia aff muncicola</i> , <i>Achyrocline tomentosa</i> , <i>Carex pichinchensis</i> , <i>Acaulimalva nubigena</i> , <i>Halenia umbellata</i>	Herbazal	Pajonal de puna húmeda cerrado	72

P-23	<i>Werneria nubigena, Vaccinium floribundum, Achyrocline ramosissima, Lachemilla vulcanica</i>	Herbazal	Pajonal de puna húmeda abierto	60
P-24	<i>Baccharis sp, Ophryosporus sp, Acaena ovalifolia, Polytrichum pycnocarpum</i>	Matorral	Matorral arbustivo d Baccharis	90
P-25	<i>Cajophora pentlandii, Calamagrostis aff eminens, Valeriana micropterina, Arenaria sp, Halenia umbellata</i>	Herbazal	Pajonal de puna húmeda cerrado	90
P-26	<i>Huperzia sp, Lysipomia laciniata, Stipa sp, Oritrophium hieracioides, Lycopodium sp, Werneria nubigena</i>	Herbazal	Pajonal de puna húmeda abierto	58
P-27	<i>Stipa sp, Pernettya prostata, Luzula afracemosa, Valeriana micropterina, Castilleja fissifolia, Halenia umbellata</i>	Herbazal	Pajonal de puna húmeda abierto	56
P-28	<i>Vaccinium floribundum, Valeriana micropterina, Galium canescens, Geranium difusun, Lachemilla orbiculata, Calamagrostis aff eminens</i>	Herbazal	Pajonal de puna húmeda cerrado	66
P-29	<i>Ah sp, Stipa sp, Valeriana micropterina, Uncinia sp, Lycopodium sp, Luzula afracemosa</i>	Herbazal	Pajonal de puna húmeda abierto	60
P-30	<i>Arenaria sp, Luzula afracemosa, Achyrocline tomentosa, Cerastium peruvianum, Ranunculus praemorsus, Alchemilla pinnata</i>	Herbazal	Bofedal	88

Fuente: elaboración propia en base a datos colectados en campo.

En la Figura 28, se observa que la densidad de la cobertura vegetal dominante en todos los puntos evaluados fue mayor al 50%, influyendo sobre la infiltración inicial del suelo (figura 28a). En comparación con el coeficiente de escorrentía (C), observados en la figura 28b, donde el valor de C, no fue superior a 0.45, lo que indica que se favorece la formación del flujo subsuperficial (SSF).

Los resultados son comparados con los encontrados por Valencia y Tobón (2017), quienes identifican baja interceptación de la precipitación por parte del pajonal, sin embargo, la presente investigación determina muy buena interceptación de la precipitación simulada por parte del pajonal.

Mosquera et al (2021), determinan que la vegetación aumenta SSF, resultado que es corroborado por la presente investigación.

Serrano et al (2013), determinan que, a mayor cobertura vegetal, existe menor escorrentía superficial, resultados que son corroborados por la presente investigación.

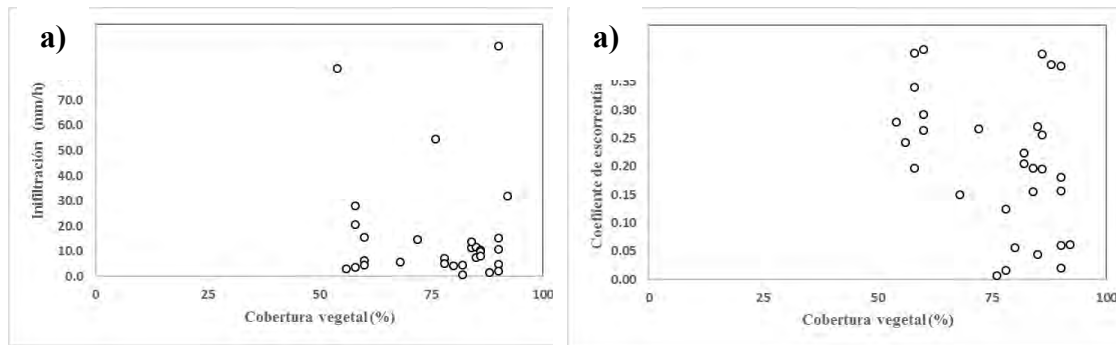


Figura 28: Influencia de la vegetación sobre la infiltración.

Fuente: elaboración propia.

Permeabilidad de la matriz

En la Figura 29a, a partir de los 30 puntos evaluados en campo, se tiene que la textura del suelo dominante en los primeros 25 cm de profundidad, fue el suelo franco con ligera presencia de rocas fragmentadas (lutita). Al aumentar la profundidad hasta los 50 cm (Figura 29b), el suelo dominante continúa siendo franco, con ligera presencia de limo.

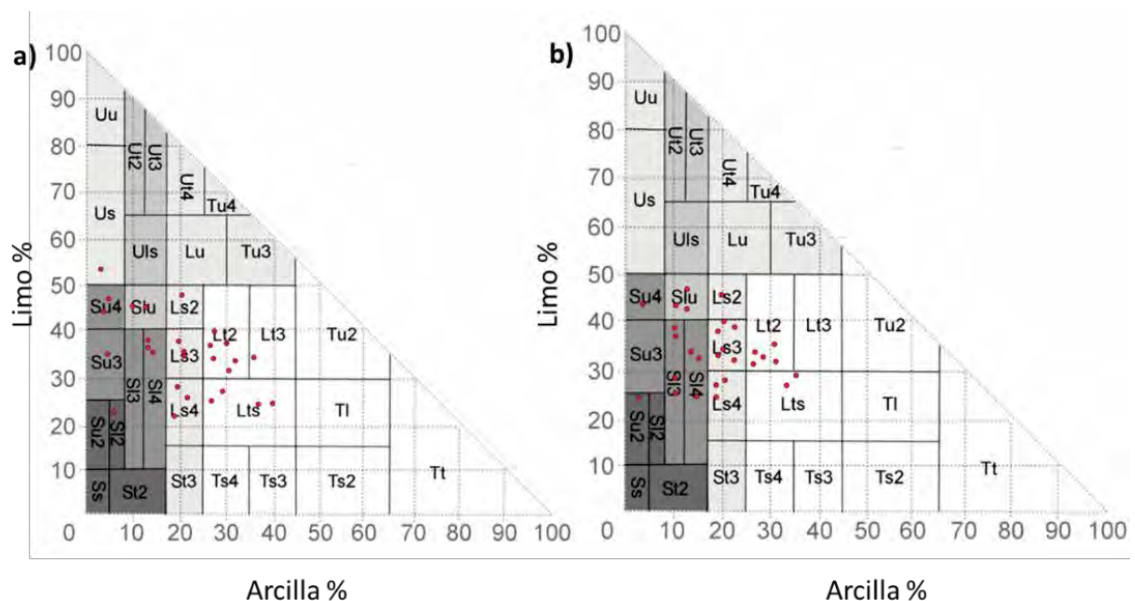


Figura 29: Evaluación de la permeabilidad de la matriz del suelo.

Fuente: elaboración propia.

Al evaluar la densidad aparente en ambas profundidades, los valores de las medidas están por debajo de 1.45 g/cm^3 , lo que indica una densidad aparente baja (suelo poroso bien aireado y con buen drenaje), valor que es influenciado también por el alto contenido de materia orgánica que llega hasta 60 % en suelos francos y 52 % en suelos francos arcillosos.

A partir de los valores obtenidos de la textura del suelo y la densidad aparente, el valor de la permeabilidad de la matriz es baja en suelos francos arcillosos, y alta en suelos francos y francos arenosos.

Macroporosidad

En la figura 30, se observa que los suelos francos arcillosos presentaron una porosidad de hasta 81%, seguido de los suelos francos y francos arenosos, con 78% y 76% respectivamente, permitiendo que la lámina de agua que infiltra dentro del suelo sea de 2.57 mm/min en suelos francos arcillosos, 2.15 mm/min en suelos francos, y 7.94 mm/min en suelos francos arenosos, los valores encontrados superan a valores estimados para la evaluación de pastizales en Colombia (Valencia y Tobón, 2017).

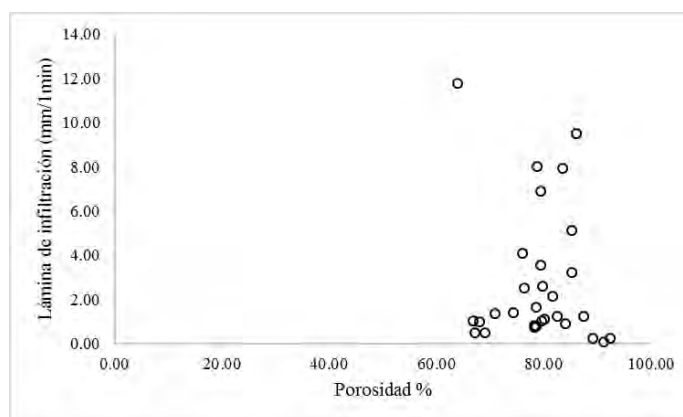


Figura 30: Influencia de la porosidad sobre la lámina de infiltración del suelo.

Fuente: elaboración propia.

4.1.2. Proceso de evaluación para identificar procesos de escorrentías dominantes

En la figura 31, se observa el perfil del suelo del punto 1, y se describe que la densidad de la vegetación es 58 %, caracterizado con la formación vegetal de herbazal, y presentando un tipo de vegetación de pajonal de puna húmeda, cuyas especies con mayor presencia son *Oreithales integrifolia*, *Werneria nubigena*, *Stipa* sp. Además, la superficie del suelo es arrugada y con contenido de materia orgánica a partir de restos vegetales hasta los 25 cm; sin embargo, se evidencia agregados inestables producto de la energía cinética de las gotas de lluvia tras las intensas precipitaciones que impactan directamente con el suelo descubierto, propiciando en un primer momento una tendencia de sellado superficial.

La superficie del suelo es hidrofílica, siendo aproximadamente 4 segundos en que una gota de lluvia logra penetrarla, para acceder a la capa de humus, que es rica en limo

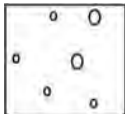
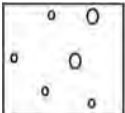
(36.5%) y pobre en arcilla (17.5 %), con baja estabilidad de agregados, y baja compactación del suelo, además de existir impacto esporádico por parte del pastoreo de ganado vacuno. Sin embargo, debido a la baja densidad aparente y al sistema extendido de macroporos esta compactación se compensa permitiendo que el agua pueda infiltrar en un inicio a 20.7 mm/h en época de secas, valor que se hace constante a 7.5 mm/h.

El valor de la macroporosidad a los 25 cm, es alta con 80 Mp/m² debido a factores como la materia orgánica (32%), lo que indica una correcta aireación y retención de agua a esa profundidad, en adelante el nivel del pH (4.6), genera un medio ácido que afecta la idoneidad ecológica de la microfauna.

La permeabilidad de la matriz en los primeros 25 cm de profundidad es alta, para un suelo de tipo “margo arenoso”, con una densidad aparente baja y porcentaje de humedad relativa que aumenta de 15.8 % a 21.9 % hasta los 100 cm. A partir de los 50 cm de profundidad, disminuye la velocidad del flujo debido a la densidad aparente alta del suelo y un aumento en el contenido de arcilla, generando una barrera para la percolación, lo que reduce la permeabilidad de la matriz.

La infiltración y la capacidad del flujo lateral va a ver influenciado en un incremento por ser un suelo hidrofílico con baja compactación, cobertura vegetal mayor a 50%, con alto contenido de materia orgánica, densidad aparente baja, macroporosidad alta a través de un sistema extendido de macroporos, y la permeabilidad de la matriz es alta a media, con capas permeables en el horizonte del suelo.

Por lo tanto, el perfil de suelo del punto P1 ubicado en la dirección NO-SE, a 4127 m., presenta un proceso de escorrentía dominante SSF2 (Flujo Subsuperficial retardado).

PERFIL DE SUELO: P 1									
Descripción del lugar SE NO Perfil  Coodenadas UTM (m) 730342/8500955 Elevación (m s.n.m.) 4127 Uso de suelo Patoreo Pendiente (%) 19 Exposición SE					Superficie del suelo Sellado superficial Agregados inestables (27 s) Hidrofobicidad Hidrofílica (4 s) Compactación del suelo Muy baja			Vegetación Cobertura vegetal 58% Formación vegetal Herbazal Tipo de vegetación Pajonal de puna húmeda Especies dominantes <i>Oreithales integrifolia</i>, <i>Werneria nubigena</i>, <i>Stipa sp</i>	
					Macroporosidad Corte horizontal (25 x 25 cm) Profundidad (25 cm) Porosidad (%)65.2 Macroporos (Mp/m2)80 Profundidad (50 cm) Porosidad (%)78.5 Macroporos (Mp/m2)96  				
Propiedades del suelo									
Prof(cm)	Color	Textura del suelo			Densidad aparente (g/cm3)	Permeabilidad	ph	Contenido de (%)	
		Limo (%)	Arcilla (%)	Tipo				Materia orgánica	Humedad
25	10YR 4/3 Marrón	36.5	17.5	SI4	0.57	Alto	4.6	32	15.8
50	10YR 5/4	33.1	18.2	Ls3	0.99	Medio	4.6	24	21.9
75	Marrón								
100	amarillento								

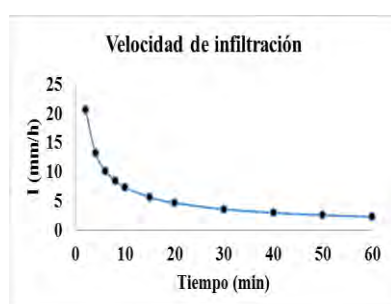
Velocidad de infiltración 		Escorrentía Hi (%)15.1 Hf(%)51.4 C0.4 Infiltración Hi (%)18.6 Hf(%)68.4 Ii (mm/h)20.7 Ib (mm/h)7.5 Tiempo Ib (min)48		Proceso de evaluación Intensidad de precipitación 30 mm/h SSF2	
---	--	--	--	---	--

Figura 31: Perfil de suelo del punto 1.

Fuente: elaboración propia, en base a datos tomados en campo.

En la tabla 20, se resume la evaluación de los 30 perfiles de suelos evaluados, mediante el esquema desarrollado por (Scherrer y Naef, 2003). Debido a la ligera

hidrofobicidad del suelo por la presencia de cenizas, las cuales generan cierta repelencia al agua por parte del suelo, el 23.3 % de los perfiles evaluados, presentó un Temporal Flujo Terrestre Hortoniano (THOF), proceso que se fue corrigiendo a partir de la influencia del tipo de suelo y del sistema extendido de macroporos, permitiendo un proceso de escorrentía dominantes diferente.

Tabla 20: Porcentaje de procesos de escorrentía dominantes evaluados en campo.

Perfil de suelo	Capa superficial 0 – 30 cm	DRP	Valor	Proceso de escorrentía dominante
P-1	THOF	SSF2	2	Flujo Subsuperficial retardado
P-2		HOF2	4	Flujo Terrestre Hortoniano Retardado
P-3	THOF	SSF2	2	Flujo Subsuperficial retardado
P-4		SSF2	2	Flujo Subsuperficial retardado
P-5	THOF	SSF2	2	Flujo Subsuperficial retardado
P-6		SSF2	2	Flujo Subsuperficial retardado
P-7	THOF	SSF2	2	Flujo Subsuperficial retardado
P-8		SSF2	2	Flujo Subsuperficial retardado
P-9	THOF	SSF2	2	Flujo Subsuperficial retardado
P-10		SSF2	2	Flujo Subsuperficial retardado
P-11	THOF	SOF2	3	Flujo Terrestre Saturado Retardado
P-12		SSF2	2	Flujo Subsuperficial retardado
P-13	THOF	SSF2	2	Flujo Subsuperficial retardado
P-14		SSF2	2	Flujo Subsuperficial retardado
P-15	THOF	SSF2	2	Flujo Subsuperficial retardado
P-16		DP	1	Percolación Profunda
P-17	THOF	HOF2	4	Flujo Terrestre Hortoniano Retardado
P-18		SOF2	3	Flujo Terrestre Saturado Retardado
P-19	THOF	SSF2	2	Flujo Subsuperficial retardado
P-20		SOF2	3	Flujo Terrestre Saturado Retardado
P-21	THOF	SOF2	3	Flujo Terrestre Saturado Retardado
P-22		SSF2	2	Flujo Subsuperficial retardado
P-23	THOF	SSF2	2	Flujo Subsuperficial retardado
P-24		SSF2	2	Flujo Subsuperficial retardado
P-25	THOF	SSF2	2	Flujo Subsuperficial retardado
P-26		SSF2	2	Flujo Subsuperficial retardado
P-27	THOF	SSF2	2	Flujo Subsuperficial retardado
P-28		SSF2	2	Flujo Subsuperficial retardado
P-29	THOF	SSF2	2	Flujo Subsuperficial retardado
P-30		SOF2	3	Flujo Terrestre Saturado Retardado

Fuente: elaboración propia.

En la figura 32, se observa los cuatro tipos de procesos de escorrentías dominantes identificados, siendo el Flujo Subsuperficial Retardado (SSF2, 73%) el tipo de escorrentía con mayor frecuencia, seguido del Flujo Terrestre Saturado Retardado (SOF2, 17%), Flujo Terrestre Hortoniano Retardado (HOF2, 7%), y Percolación Profunda (DP, 3%), por el método manual planteado por Scherrer y Naef en el 2003.

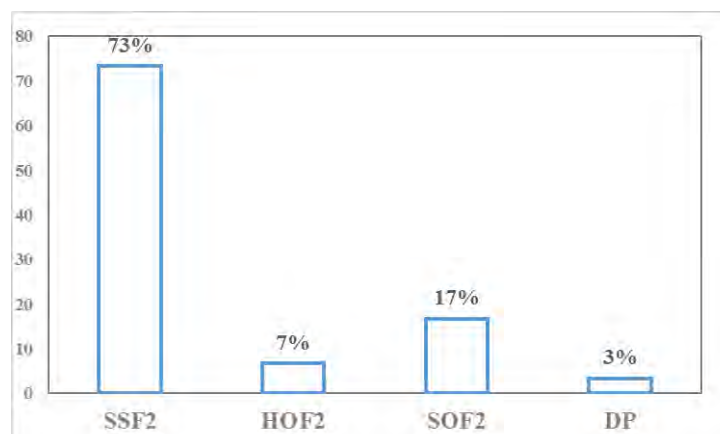


Figura 32: Porcentaje de procesos de escorrentías dominantes evaluados en campo.

Fuente: elaboración propia.

Este resultado, a partir de 30 puntos evaluados para un área de 346 ha con una topografía accidentada, es comparado con los datos de procesos de escorrentías dominantes a partir de un procedimiento manual, referidos por Antonetti et al (2016), quienes identifican que en dos cuencas pequeñas de Plateau (Suiza), ubicados a una altura entre 409 a 850 m. con cobertura dominada por pastizales, existen 4 clases (DP, SSF3, SSF2, SOF2); Muller et al (2009), en Renania-Palatinado (Alemania), realizó sus modelos a partir de 7 clases (HOF1, SOF1, SOF2, SOF3, SSF1, SSF2, SSF3), y Schmocker et al (2007), identifican 5 clases (HOF1, SOF1, SOF2, SOF3, SSF3) partir de 43 perfiles de suelos ubicados en dos cuencas a 30 km al noreste de Zúrich (Suiza).

4.2. Analisis de los índices espectrales de vegetación y el perfil espectral de los tipos de escorrentías dominantes.

4.2.1. Evaluación de índices espectrales de vegetación

En la Figura 33, se observa los tres índices de vegetación espectral calculado a partir de una imagen satelital Sentinel 2B, cuya resolución espacial es de 10m x 10m. Los índices son: Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) cuyos valores de reflectancia mínimo y máximo es 0.03 y 0.9 respectivamente, valor promedio de reflectividad 0.43 y una desviación estándar de 0.12; Índice de Suelo Desnudo (BSI) cuyos valores de reflectancia mínimo y máximo es -0.31 y 0.67 respectivamente, valor promedio de reflectividad 0.11 y una desviación estándar de 0.09; y el Índice de Vegetación Ajustado a la Humedad (MAVI) cuyos valores de reflectancia mínimo y máximo es 0.005 y 0.57 respectivamente, valor promedio de reflectancia 0.25 y una desviación estándar de 0.07.

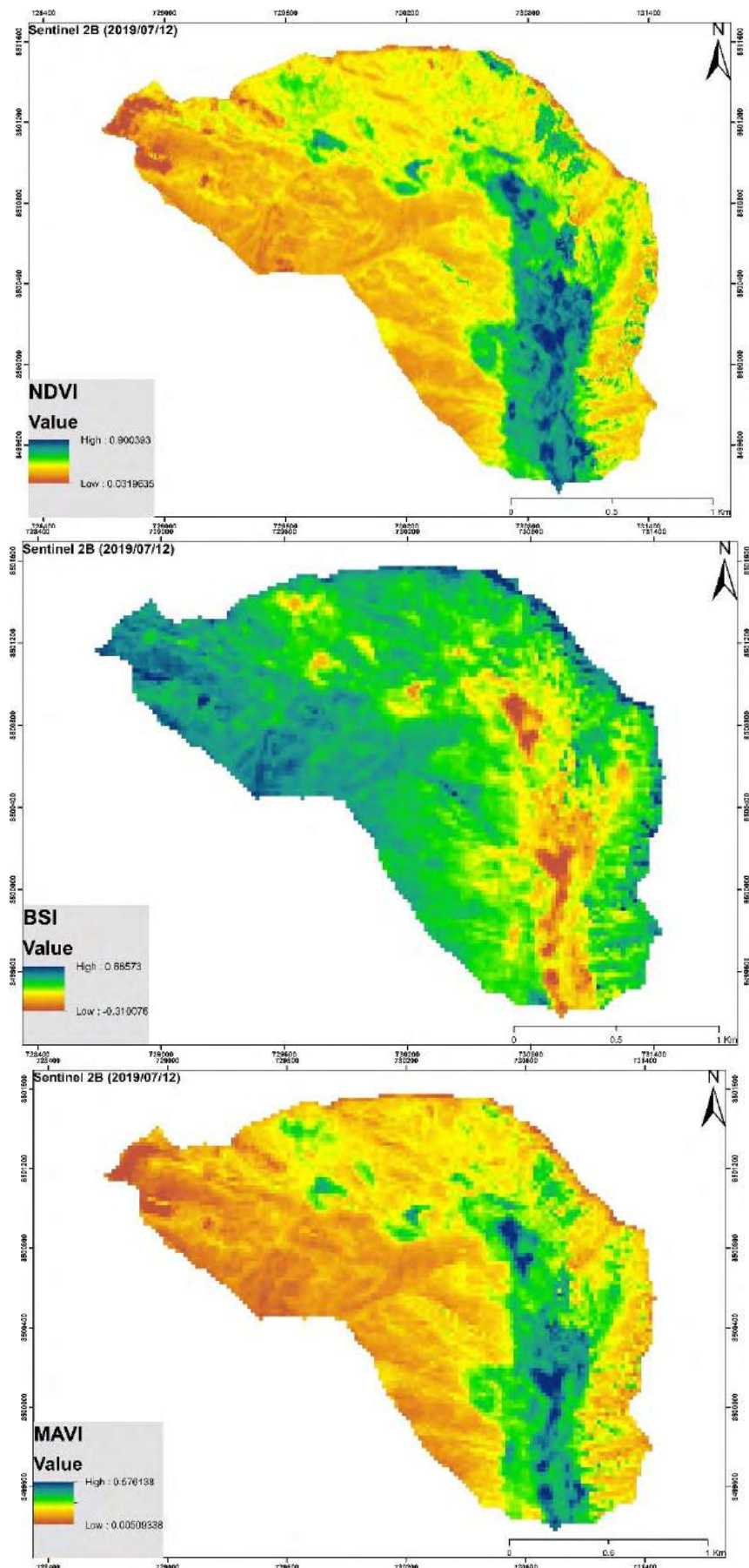


Figura 33: Índices espectrales de vegetación evaluados.
 Fuente: elaboración propia imagen satelital Sentinel 2B (2019/07/12).

A partir del polígono del área de estudio, dividido en cuadrículas de 10 m x 10 m, se obtuvo un total de 34610 píxeles para la imagen Sentinel 2B, de cada índice espectral. se extrajo el valor de cada índice espectral de los 30 píxeles que coincidieron con los puntos evaluados en campo para identificar procesos de escorrentías dominantes (Tabla 21).

Tabla 21: Valores de reflectancia de los índices espectrales de vegetación.

Punto	NDVI	BSI	MAVI
P1	0.37	0.12	0.23
P2	0.54	0.05	0.29
P3	0.42	0.09	0.26
P4	0.35	0.06	0.35
P5	0.47	0.01	0.32
P6	0.49	-0.04	0.34
P7	0.75	-0.10	0.44
P8	0.58	0.00	0.38
P9	0.66	-0.02	0.39
P10	0.66	0.03	0.36
P11	0.47	0.04	0.31
P12	0.39	0.11	0.24
P13	0.45	0.13	0.25
P14	0.47	0.10	0.27
P15	0.47	0.05	0.30
P16	0.29	0.19	0.17
P17	0.39	0.17	0.22
P18	0.53	0.04	0.32
P19	0.46	0.00	0.31
P20	0.57	-0.04	0.37
P21	0.44	0.01	0.29
P22	0.48	0.03	0.29
P23	0.40	0.07	0.24
P24	0.66	0.03	0.38
P25	0.52	-0.02	0.33
P26	0.39	0.17	0.24
P27	0.45	0.21	0.25
P28	0.63	0.02	0.38
P29	0.45	0.05	0.31
P30	0.64	-0.05	0.39

Fuente: elaboración propia, a partir de la imagen satelital Sentinel 2B (2019/07/12).

Para identificar el mejor modelo estadístico se evalúan los supuestos de normalidad, homocedasticidad, linealidad a partir de los valores residuales y valores ajustados de un

modelo lineal entre la variable respuesta (DRP) y cada variable predictora (NDVI, BSI y MAVI).

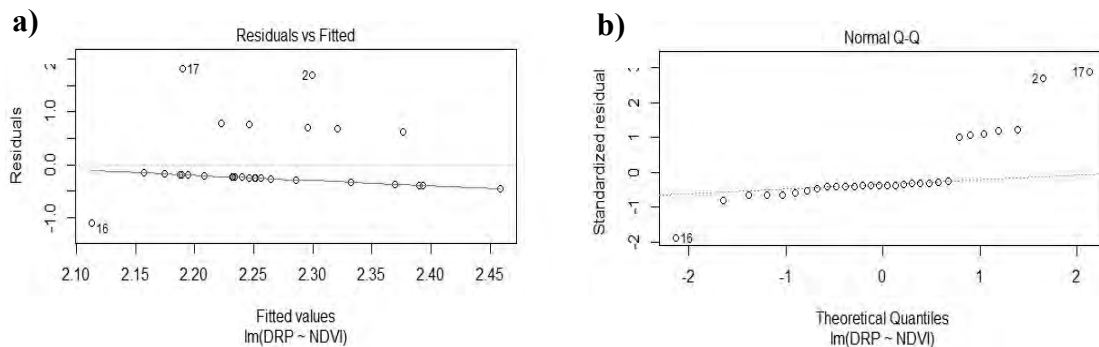


Figura 34: Evaluación del NDVI

Fuente: elaboración propia.

En la Figura 34a, se observa los valores residuales y valores ajustados entre la variable respuesta (DRP) y la variable predictora (NDVI), evidenciando que no se cumple con el supuesto de homocedasticidad al no presentarse un patrón de distribución entre los datos, así mismo en el gráfico Cuantil – Cuantil (figura 34b), los datos no cumplen el supuesto de linealidad al alejarse de la línea promedio. Por último, tras realizar el test de normalidad de Shapiro - Wilk para contrarrestar la normalidad de los datos, el valor es $W = 0.96$ con un valor de p de 0.27, rechazando la hipótesis nula de que los datos cumplan una distribución normal.

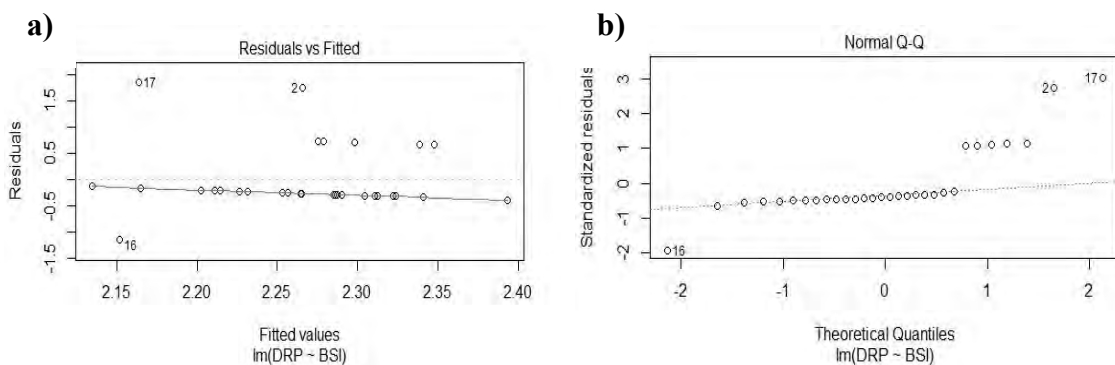


Figura 35: Evaluación del BSI

Fuente: elaboración propia.

En la Figura 35a, se observa los valores residuales y valores ajustados entre la variable respuesta (DRP) y la variable predictora (BSI), evidenciando que no se cumple con el supuesto de homocedasticidad al no presentarse un patrón de distribución entre los datos, así mismo en el gráfico Cuantil – Cuantil (figura 35b), los datos no cumplen el supuesto de linealidad al alejarse de la línea promedio. Por ultimo tras realizar el test de normalidad de Shapiro - Wilk para contrarrestar la normalidad de los datos, el valor

es $W = 0.97$ con un valor de p de 0.53, rechazando la hipótesis nula de que los datos cumplan una distribución normal.

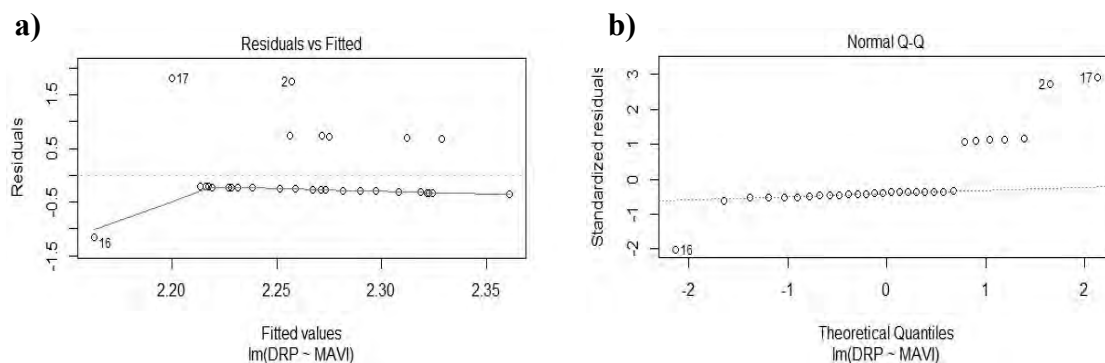


Figura 36: Evaluación del MAVI

Fuente: elaboración propia.

En la Figura 36a, se observa los valores residuales y valores ajustados entre la variable respuesta (DRP) y la variable predictora (MAVI), evidenciando que no se cumple con el supuesto de homocedasticidad al no presentarse un patrón de distribución entre los datos, así mismo en el gráfico Cuantil – Cuantil (figura 36b), los datos no cumplen el supuesto de linealidad al alejarse de la línea promedio. Por último, tras realizar el test de normalidad de Shapiro - Wilk para contrarrestar la normalidad de los datos, el valor es $W = 0.98$ con un valor de p de 0.84, rechazando la hipótesis nula de que los datos cumplan una distribución normal.

Tras realizar la evaluación de supuestos de normalidad, homocedasticidad y linealidad, de la variable respuesta (DRP) y cada variable predictora (NDVI, BSI y MAVI), y al probar que estos supuestos no se cumplen, el modelo estadístico a utilizar es el Modelo Aditivo Generalizado, que permite analizar la influencia de cada predictor sobre la variable respuesta de forma individual, algo muy útil a la hora de hacer inferencia.

4.2.1.1. Modelo aditivo generalizado (GAM)

Dentro de la estructura de un Modelo Aditivo Generalizado, se define la distribución de datos de la variable respuesta, para ejecutar los algoritmos que se encuentran dentro de los paquetes en R, por lo tanto, en la figura 37, se observa que la mejor distribución de datos que corresponde a la variable DRP mediante su histograma la evaluación del histograma, corresponde a una distribución gaussiana, parámetro que será incluido dentro de nuestro modelo más adelante.

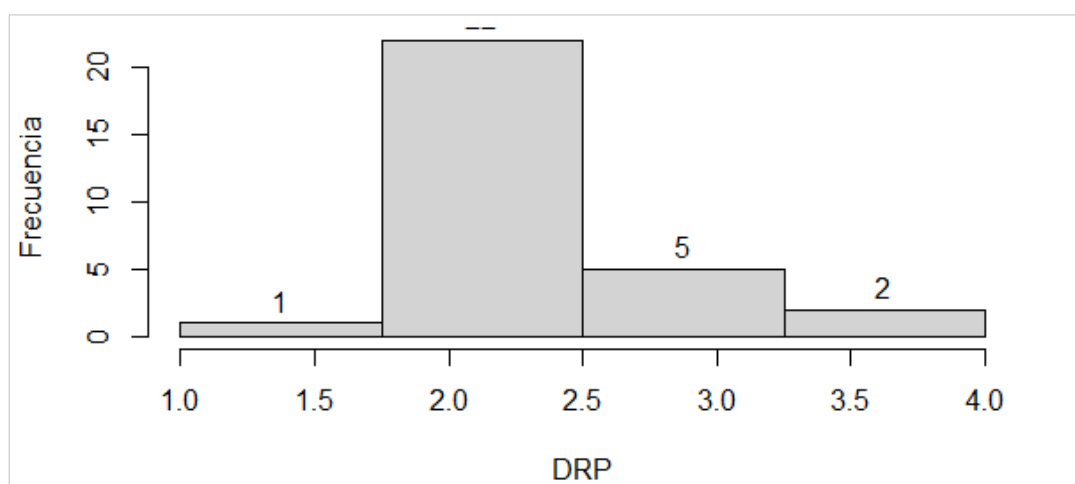


Figura 37: Distribución de la variable respuesta (DRP)

Fuente: elaboración propia.

Dado que el modelo es aditivo, se puede estudiar el efecto de cada predictor sobre la variable respuesta, manteniendo constantes el resto de predictores. Para esto, las representaciones gráficas son de mucha ayuda, es así que teniendo toda la información para identificar la mejor combinación de las variables predictoras respecto a la variable respuesta, primero se evalúa un modelo aditivo generalizado (GAM) saturado, aplicado a la variable DRP con todas las variables predictoras (NDVI, BSI y MAVI). El modelo permitió suavizar (ajuste no lineal), obteniendo los datos para una interpretación mucho mayor entre la información obtenida en campo de los tipos de escorrentías dominantes y los valores extraídos de la capa raster de cada índice espectral de vegetación.

Tabla 22: GAM1 (DRP~NDVI, MAVI, BSI)

Familia:	Gaussiana	
Función de enlace	Identity	
Fórmula	DRP ~ s(NDVI) + s(MAVI) + s(BSI)	
Significado aproximado de los términos suavizados		
	edf	p – value
s(NDVI)	4.295	0.328
s(MAVI)	6.862	0.145
s(BSI)	1	0.542
Desvianza explicada	67.60%	

Fuente: elaboración propia.

La tabla 22, muestra la fórmula del modelo GAM1 aplicado a todas las variables predictoras, con una distribución Gaussiana de la variable respuesta, así, se observa que respecto al NDVI y MAVI existe una relación no lineal con 4.295, 6.862 grados de libertad respectivamente, sin embargo, el BSI, sí presenta una relación lineal. Por otro lado, al evaluar el valor de p, se observa que todos los valores están por encima del valor

de significancia determinado para el modelo ($p < 0.05$), por lo que, las variables predictoras para este primer modelo podrían simplificarse aún más, quitando del modelo saturado el BSI, por presentar un valor mayor a p (0.542). Por último, el modelo, tiene una desviación explicada de 67.60 %, valor que indica menos errores residuales que no se explicaron por el modelo.

Para ajustar el segundo modelo GAM2, se quita de la formula el BSI, por no ser significativo respecto al modelo, obteniendo lo siguiente:

Tabla 23: GAM2 (DRP~NDVI, MAVI)

Familia:	Gaussiana	
Función de enlace	Identity	
Fórmula	DRP ~ s(NDVI) + s(MAVI)	
Significado aproximado de los términos suavizados		
	Edf	p – value
s(NDVI)	4.402	0.371
s(MAVI)	7.111	0.123
Desviianza explicada	67.80%	

Fuente: elaboración propia.

La tabla 23, muestra la fórmula del modelo GAM2 aplicado a las variables predictoras NDVI y MAVI, con una distribución Gaussiana de la variable respuesta, así, se observa que respecto al NDVI y MAVI existe una relación no lineal con 4.402 y 7.111 grados de libertad respectivamente, sin embargo. Por otro lado, al evaluar el valor de p , se observa que ambos valores están por encima del valor de significancia determinado para el modelo ($p < 0.05$), por lo que, las variables predictoras para este segundo modelo podrían simplificarse aún más, quitando del modelo saturado el NDVI, por presentar un valor mayor a p (0.371). Por último, el modelo, tiene una desviación explicada de 67.80 %, valor superior al modelo GAM1 y que indica menos errores residuales que no se explicaron por el modelo.

Para ajustar el tercer modelo GAM3, se quita de la formula el NDVI, por no ser significativo respecto al modelo, obteniendo lo siguiente:

Tabla 24: GAM3 (DRP~MAVI)

Familia:	Gaussiana
Función de enlace	Identity
Fórmula	DRP ~ s(MAVI)
Significado aproximado de los términos suavizados	

	edf	p – value
s(MAVI)	7.204	0.115
Desviianza explicada		46.20%

Fuente: elaboración propia.

La tabla 24, muestra la fórmula del modelo GAM3 aplicado a la variable predictora MAVI, con una distribución Gaussiana de la variable respuesta, así, se observa que existe una relación no lineal con 7.204 grados de libertad. El modelo, tiene una desviación explicada de 46.20 %, valor inferior al modelo GAM1 y GAM2, que indica mayores errores residuales que no se explicaron por el modelo.

4.2.1.2. Evaluación del modelo

Tras el ajuste de los tres modelos aditivos generalizados (GAM1, GAM2, y GAM3), se identifica que el mejor modelo resulta ser GAM2, a partir de un análisis de varianza (ANOVA) entre GAM1 y GAM2 que permite una validación cruzada para seleccionar el mejor modelo entre dos modelos con distinto grado de polinomio, se obtiene que la variable predictora BSI no es significativa para el modelo, y entre GAM2 y GAM3, el valor de la desviación explicada disminuye para el modelo GAM3. Así mismo, para corroborar los resultados se observa en la tabla 25, donde el modelo GAM2 presenta un bajo valor de error cuadrático medio (0.357), y bajo valor de AIC (50.376), lo que indica que el índice NDVI junto al MAVI son los índices que mejor predicen los Procesos de Escorrentías Dominantes identificados en campo.

Este resultado indicaría que el índice NDVI y MAVI, predicen las escorrentías dominantes en cabecera de cuenca, permitiendo discriminar mejor la cobertura vegetal, para la diferenciación ecohidrológica del paisaje, coincidiendo con las investigaciones de Garcia y Otto (2015), quienes utilizan el NDVI y un índice de humedad del suelo para cuantificar la extensión espacial de tipos y sub tipos de los humedales altoandinos.

Tabla 25: RMSE y AIC de los Modelos

GAM	Error Cuadrático Medio (RMSE)	Criterio de Akaike (AIC)
GAM1	0.358	51.834
GAM2	0.357	50.376
GAM3	0.461	57.118

Fuente: elaboración propia.

4.2.1.3. Inspección del Modelo GAM2

A partir del modelo GAM2, se evidencia que el índice que el NDVI y MAVI indicaron una buena predicción espacial de la susceptibilidad para la identificación de Procesos de Escorrentías Dominantes. Para evitar cometer errores en la estimación de los suavizadores, los grados efectivos de libertad (edf) del modelo son menores que los valores de k (numero de nodos), siendo el valor de k igual a 9, y los grados efectivos de libertad son 4.40 y 7.11 para el NDVI y MAVI respectivamente. Este resultado indica que el suavizador esta bien definido, además el valor de p es mayor a 0.05, para ambos índices, lo que indica que se esta trabajando bien con la base de los suavizadores, manifestandos en una adecuada ondulando de la curva.

Al tratarse de un modelo con 2 predictores, no se puede hacer una representación gráfica simultánea del modelo. En lugar de eso, se representa la influencia de cada predictor, por separado.

El resultado del modelo GAM, indicó que las áreas de mayor susceptibilidad corresponden a sectores que concentraron la totalidad de los procesos evaluados. De acuerdo al análisis de las variables predictoras, estos factores fueron los de mayor aporte al modelo. En este sentido, la susceptibilidad se condicionó por valores de reflectancia altos que están asociados al vigor y humedad de la vegetación, y la cual de acuerdo a los resultados de DRP concentra un alto porcentaje de saturación del suelo. El resultado del modelo identificó de manera más concisa las áreas de susceptibilidad, donde de acuerdo al análisis de las variables predictoras, se determinó que la susceptibilidad se explicó a través de variables que presentaron un buen desempeño en el modelo GAM. De esta forma, la calidad del modelo experimentó un mejor ajuste con un número reducido de variables, las que tienen mayor significancia en la determinación de la susceptibilidad (Figura 38).

Los resultados encontrados son comparados con los identificados por Otto et al (2011) y García y Otto (2015), quienes mencionan que el NDVI y NDII, son buenos indicadores de la presencia de flujos de agua; para la presente investigación los resultados indican que el NDVI y MAVI serían buenos indicadores para predecir tipos de escorrentías dominantes.

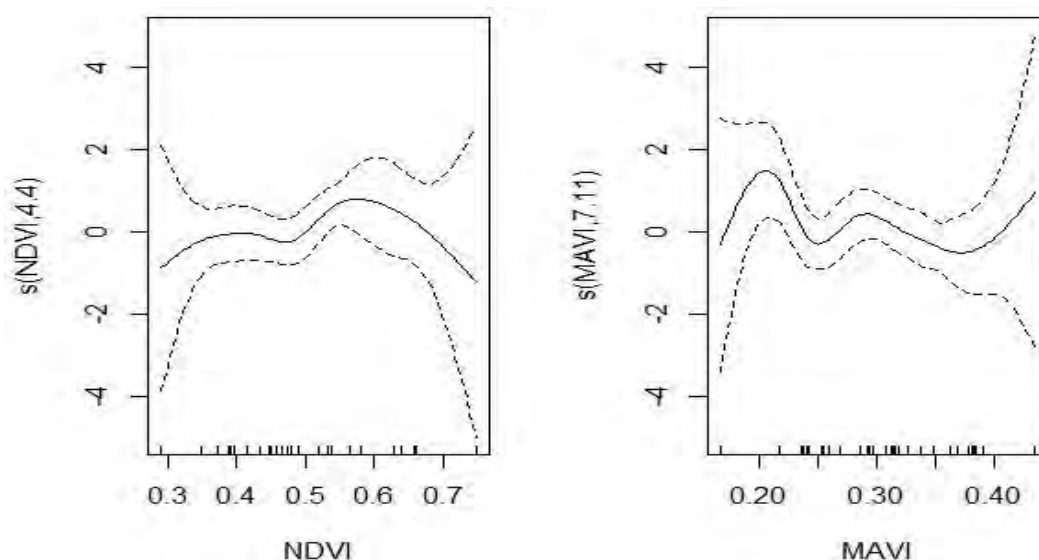


Figura 38: Curva GAM del NDVI y MAVI

Fuente: elaboración propia.

4.2.2. Evaluación de bandas espectrales

En la Tabla 26, se muestra los valores de reflectancia de las 13 bandas, extraídas a partir de una imagen satelital Sentinel 2B, para los 30 puntos evaluados en la zona de estudio.

Tabla 26: Valores de reflectancia extraídos de una imagen satelital Sentinel 2B

	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B8A	B9	B10	B11	B12
P1	873	848	932	1134	1460	2056	2295	2295	1636	71	2689	1513	2616
P2	808	653	687	715	980	1463	1691	1952	1293	58	1685	916	1964
P3	892	800	854	1060	1385	1909	2149	2238	1650	75	2469	1341	2542
P4	806	602	569	508	817	1400	1553	1482	1340	40	1813	1010	1887
P5	743	636	620	660	744	1130	1279	1488	666	21	1146	660	1441
P6	754	641	625	647	848	1279	1416	1571	826	28	1160	634	1686
P7	741	526	414	294	611	1198	1425	998	808	21	1005	582	1537
P8	794	561	494	407	625	1070	1218	1239	1031	32	1169	631	1453
P9	786	608	586	499	766	1392	1603	1744	1104	29	1517	843	1877
P10	817	674	699	635	990	1932	2247	2366	1435	43	2347	1307	2607
P11	940	822	894	1065	1344	2136	2493	2656	2055	68	2576	1406	2916
P12	1019	881	992	1231	1750	2417	2705	2676	2231	84	3188	1787	3084
P13	882	756	765	887	1175	1691	1920	2047	1538	71	2409	1502	2237
P14	822	625	614	673	942	1337	1473	1525	1356	60	1634	919	1722
P15	813	639	632	701	963	1421	1614	1628	1271	59	1606	935	1860
P16	877	769	707	785	907	1168	1282	1316	1036	63	1747	1246	1477
P17	917	810	850	988	1352	1787	2047	2040	1556	79	2895	1727	2407
P18	837	792	852	906	1350	2078	2423	2577	1524	66	2655	1497	2910
P19	791	666	636	631	768	1236	1418	1450	951	35	1227	704	1526
P20	799	659	682	687	1005	1644	1928	1995	1570	44	1612	827	2291
P21	782	650	630	682	852	1207	1435	1451	1387	40	1233	694	1642
P22	1013	969	1204	1364	1978	2993	3383	3646	2352	93	3369	1792	3934

P23	958	1056	1278	1583	2095	3013	3392	3532	2218	76	3511	1953	3815
P24	927	658	688	617	1010	1925	2187	2262	2105	81	2367	1219	2569
P25	849	823	920	1080	1588	2455	2855	2969	1596	63	2484	1310	3356
P26	708	534	439	430	484	624	702	722	485	29	789	461	764
P27	725	483	339	252	310	436	463	324	455	26	458	263	457
P28	705	470	328	213	224	289	328	316	328	17	235	145	352
P29	761	561	464	425	420	613	673	813	748	28	580	335	735
P30	844	786	919	922	1360	2539	2994	3591	2086	55	2732	1479	3569

Fuente: elaboración propia imagen satelital Sentinel 2b (2019/07/12).

En la Tabla 27, se muestra el promedio de los valores de reflectancia de las 13 bandas, extraídas a partir de una imagen satelital Sentinel 2b, combinando los resultados con los tipos de escorrentías dominantes identificados en campo.

Tabla 27: Promedio de los valores de reflectancia asociado a los DRP

	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B8A	B9	B10	B11	B12
DP	854	703	614	651	773	931	1027	1008	1030	68	1413	1025	1174
SSF2	826	683	686	724	998	1537	1741	1788	1279	49	1781	993	2003
SOF2	840	742	795	852	1182	1921	2255	2454	1724	55	2162	1181	2666
HOF2	884	784	841	961	1282	1812	2065	2247	1584	75	2514	1467	2428

Fuente: elaboración propia imagen satelital Sentinel 2B (2019/07/12).

En la figura 39, se muestra el perfil espectral de los tipos de escorrentías dominantes, utilizando los valores de reflectancia de las bandas espectrales, identificando que la banda 8 (infrarrojo cercano) muestra valores de reflectancias diferentes para cada tipo de escorrentías dominantes, mientras que las bandas 2, 4, y 11 muestran ligeras diferencias.

Los resultados obtenidos son comparados por los mencionados por Chuvieco (2008), quien indica que la banda del infrarrojo cercano detecta masas vegetales y concentraciones de humedad, en la presente investigación se evidenció dicha aseveración.

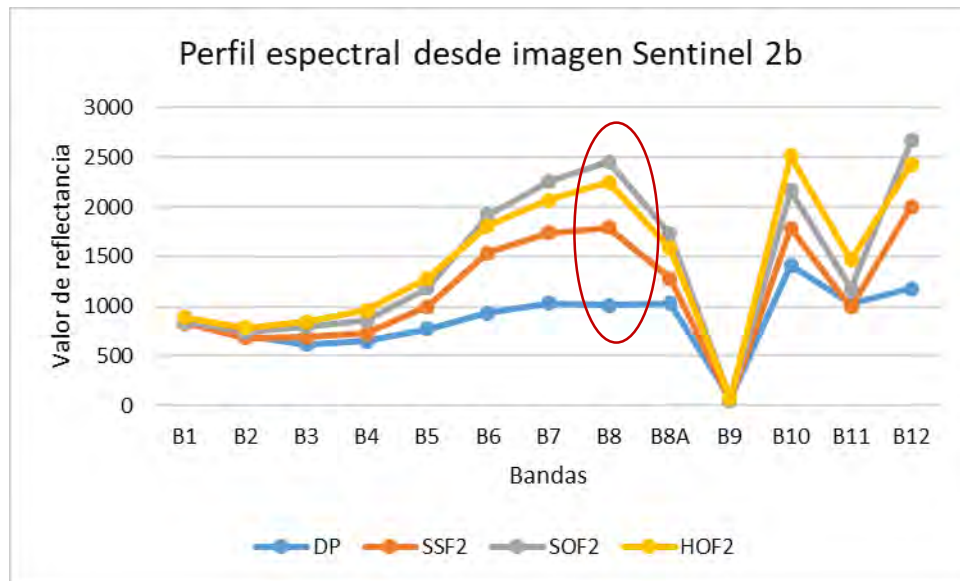


Figura 39: Perfil espectral de los tipos de escorrentías

Fuente: elaboración propia.

Para una mejor visualización de los datos espectrales de obtuvo un gráfico del perfil espectral a nivel de densidades, donde las líneas verticales representan la media de los valores de reflectancia (Figura 40).

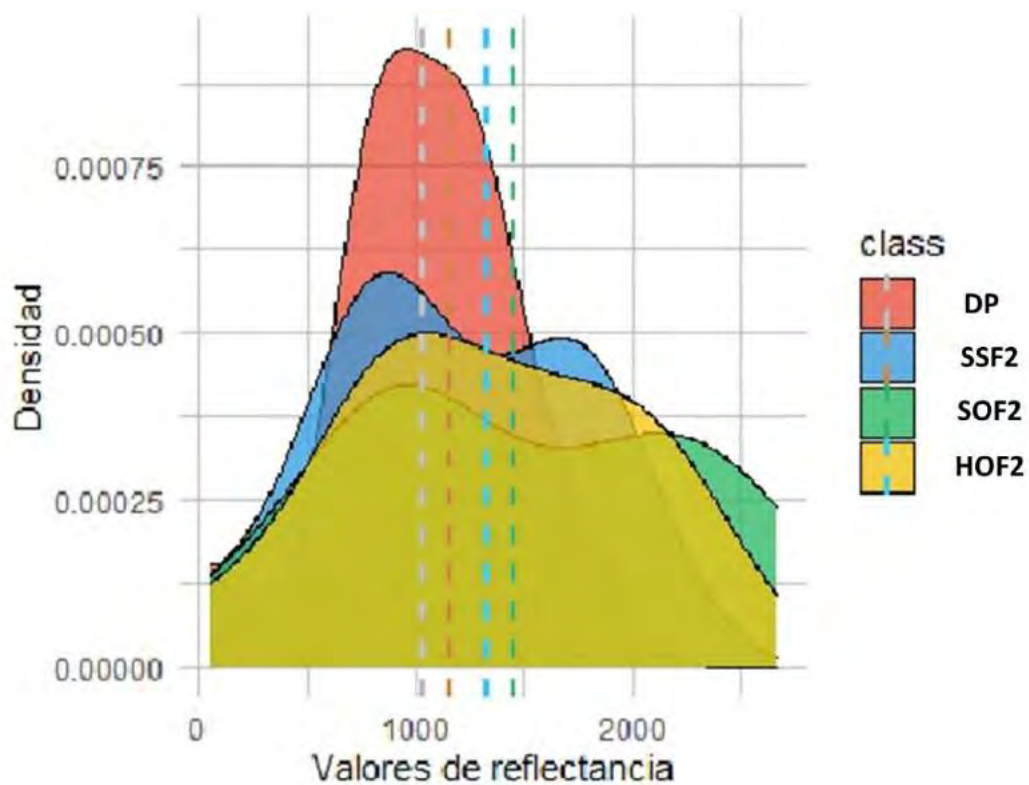


Figura 40: Histograma de densidades del perfil espectral

Fuente: elaboración propia.

4.3. Evaluación de algoritmos inteligentes de clasificación, para el reconocimiento automático de los tipos de escorrentías dominantes.

4.3.2. Entrenamiento y evaluación de algoritmos

Para la etapa de entrenamiento de los modelos se usaron algoritmos de clasificación bajo el siguiente criterio (Tabla 28):

Tabla 28: Validación cruzada:

Grupo	Descripción	% de la base de datos
1	Grupo de entrenamiento	80%
2	Grupo de evaluación	20%

Fuente: elaboración propia.

Se determinó el algoritmo más eficaz en la tarea de reconocimiento utilizando los patrones identificados, realizando la evaluación de desempeño de los modelos a través de la matriz de confusión tenemos los siguientes resultados:

Se trabajó con 09 puntos evaluados que corresponden al 20 % del total y 21 puntos evaluados que corresponden al 80% (Tabla 29).

Tabla 29: Valores evaluados y predichos por los algoritmos

Redes Neuronales		Random Forest		Máquinas de Vectores de Soporte	
Evaluación	Predicción	Evaluación	Predicción	Evaluación	Predicción
1	1	1	1	1	1
2	2	2	2	2	2
2	2	2	2	2	2
2	2	2	2	2	2
2	2	2	4	2	2
2	2	2	2	2	2
3	2	3	3	3	2
4	2	4	2	4	2
4	2	4	2	4	2

Fuente: elaboración propia.

4.3.2.1. Algoritmo de Redes Neuronales

En la tabla 30 se observa la matriz de confusión del algoritmo de redes neuronales, con un total de 9 muestras evaluadas. El modelo estimó correctamente el SSF2.

Tabla 30: Matriz de confusión del algoritmo de redes neuronales

Matriz de confusión N=9		Estimado por el algoritmo			
		DP	SSF2	SOF2	HOF2
Real	DP	0	0	0	0
	SSF2	1	5	1	2
	SOF2	0	0	0	0

	HOF2	0	0	0	0
--	-------------	---	---	---	---

Fuente: elaboración propia.

En la tabla 31 se observa el desempeño del algoritmo de redes neuronales respecto a los tipos de escorrentías evaluados. El modelo, presenta alta sensibilidad para diferenciar al SSF2, alta especificidad para distinguir al DP, SOF2 y HOF2. La cantidad de predicciones correctas realizadas por el modelo representa un 55%.

Tabla 31: Evaluación de desempeño del algoritmo de redes neuronales

95% IC	DP	SSF2	SOF2	HOF2
Sensibilidad	0	1	0	0
Especificidad	1	0	1	1
Predicción de valores positivos	NaN	0.5	NaN	NaN
Predicción de valores negativos	0.9	NaN	0.9	0.8
Exactitud del modelo	55%			
Indice Kappa de Fuzzy	0			

Fuente: elaboración propia.

4.3.2.2. Algoritmo de Randon Forest

En la tabla 32 se observa la matriz de confusión del algoritmo de randon forest, con un total de 9 muestras evaluadas. El modelo estimó correctamente el DP y el SSF2.

Tabla 32: Matriz de confusión del algoritmo de random forest

Matriz de confusión N=9		Estimado por el algoritmo			
		DP	SSF2	SOF2	HOF2
Real	DP	1	0	0	0
	SSF2	0	5	1	2
	SOF2	0	0	0	0
	HOF2	0	0	0	0

Fuente: elaboración propia.

En la tabla 33 se observa el desempeño del algoritmo de random forest respecto a los tipos de escorrentías evaluados. El modelo, presenta alta sensibilidad para diferenciar al DP y SSF2, alta especificidad para distinguir al DP, SOF2 y HOF2. La cantidad de predicciones correctas realizadas por el modelo representa un 67% con un índice de kappa de 33%, lo que indica un valor aceptable entre las medidas observadas y predecidas por el modelo.

Tabla 33: Evaluación de desempeño del algoritmo de random forest

95%	DP	SSF2	SOF2	HOF2
Sensibilidad	1	1	0	0
Especificidad	1	0.2	1	1
Predicción de valores positivos	1	0.6	NaN	NaN
Predicción de valores negativos	1	1	0.9	0.8
Exactitud del modelo	67%			
Indice Kappa de Fuzzy	33%			

Fuente: elaboración propia.

4.3.2.3. Algoritmo de Máquinas de Vectores de Soporte

En la tabla 34 se observa la matriz de confusión del algoritmo de máquinas de vectores de soporte, con un total de 9 muestras evaluadas. El modelo estimó correctamente el DP y el SSF2.

Tabla 34: Matriz de confusión del algoritmo de Máquinas de Vectores de Soporte

Matriz de confusión N=9		Estimado por el algoritmo			
		DP	SSF2	SOF2	HOF2
Real	DP	1	0	0	0
	SSF2	0	5	1	2
	SOF2	0	0	0	0
	HOF2	0	0	0	0

Fuente: elaboración propia.

En la tabla 35 se observa el desempeño del algoritmo de máquinas de vectores de soporte respecto a los tipos de escorrentías evaluados. El modelo, presenta alta sensibilidad para diferenciar al DP y SSF2, alta especificidad para distinguir al DP, SOF2 y HOF2. La cantidad de predicciones correctas realizadas por el modelo representa un 67% con un índice de kappa de 33%, lo que indica un valor aceptable entre las medidas observadas y predecidas por el modelo.

Tabla 35: Evaluación de desempeño del algoritmo de Maquinas de Vectores de Soporte

CI 95%	DP	SSF2	SOF2	HOF2
Sensibilidad	1	1	0	0
Especificidad	1	0.2	1	1
Predicción de valores positivos	1	0.6	NaN	NaN
Predicción de valores negativos	1	1	0.9	0.8
Exactitud del modelo	67%			
Indice Kappa de Fuzzy	33%			

Fuente: elaboración propia.

Tabla 36: Evaluación del desempeño de algoritmos

Algoritmos	Exactitud	Margen de error	Kappa
Redes Neuronales	56%	44%	0%
Bosque Aleatorio	67%	33%	33%
Máquinas de Vectores de Soporte	67%	33%	33%

Fuente: elaboración propia.

Los modelos NNT, RF y SVM, explican solo un 56%, 67% y 67% respectivamente los procesos de escorrentías dominantes, valores que son menores a los reportados por

Muller et al (2009) quienes hacen uso de la pendiente, permeabilidad y uso de suelos, cuyo modelo explicaba un 79%.

Se coincide con Antonetti et al (2016), quienes mencionan que los modelos basados en el uso de sistemas de información geográfica presentan diferencias en inexactitud y resolución, respecto al método manual.

4.4. Mapeo de los tipos de escorrentías dominantes para toda la zona de estudio.

Los DRP identificados para la zona de estudio utilizando modelos de Aprendizaje Automático fueron DP, SSF2, SOF2 y HOF2 (Tabla 37).

Tabla 37: DRP identificados usando modelos de Aprendizaje Automático

	NNT		RF		SVM	
	Área (ha)	%	Área (ha)	%	Área (ha)	%
DP	0.4	0.1	15.6	4.5	37.0	10.7
SSF2	227.0	66.1	261.5	75.7	222.1	64.2
SOF2	115.9	33.8	11.0	3.2	16.6	4.8
HOF2	0.0	0.0	57.2	16.6	70.0	20.2

Fuente: elaboración propia.

4.4.1. Algoritmo de Redes Neuronales (NNT)

A partir del modelo NNT se identificó para la zona de estudio, 3 tipos de procesos de escorrentías dominantes: Percolación Profunda (DP), Flujo Subterráneo retardado (SSF2) y Flujo Terrestre Saturado retardado (SOF2). El tipo de escorrentía dominante con mayor presencia en la zona de estudio es el SSF2 con 66.1%, seguido del SOF2 y DP con 33.8% y 0.1% respectivamente. El modelo no permitió identificar el HOF2 (Figura 41).

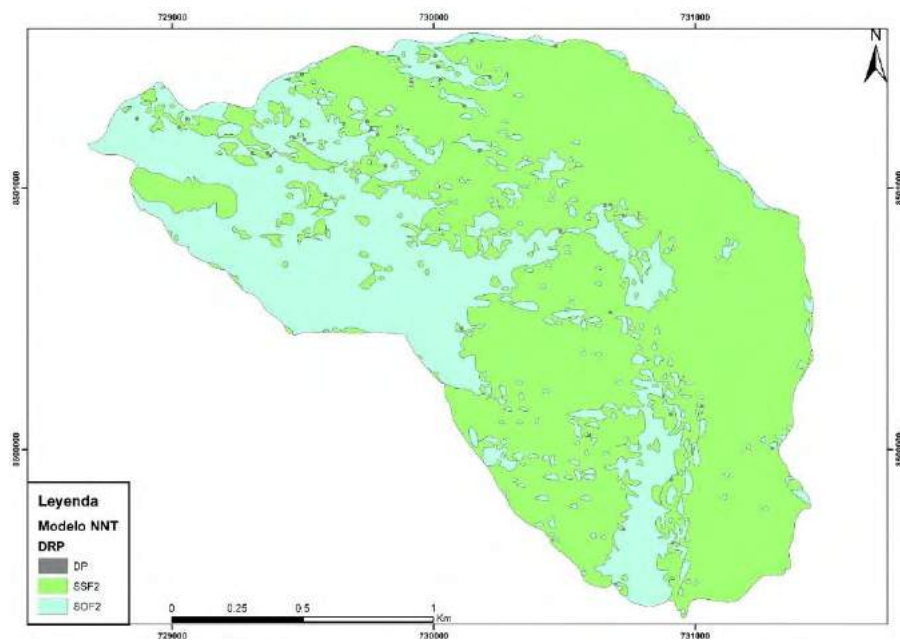


Figura 41: Modelo DRP – NNT

Fuente: mapa obtenido a partir del modelo NNT

4.4.2. Algoritmo de Bosque Aleatorio (RF)

A partir del modelo RF se identificó para la zona de estudio, 4 tipos de procesos de escorrentías dominantes: Percolación Profunda (DP), Flujo Subterráneo retardado (SSF2), Flujo Terrestre Saturado retardado (SOF2) y Flujo Hortoniano retardado (HOF2). El tipo de escorrentía dominante con mayor presencia en la zona de estudio es el SSF2 con 75.7%, seguido del HOF2, DP y SOF2 con 16.6%, 4.5% y 3.2% respectivamente (figura 42).

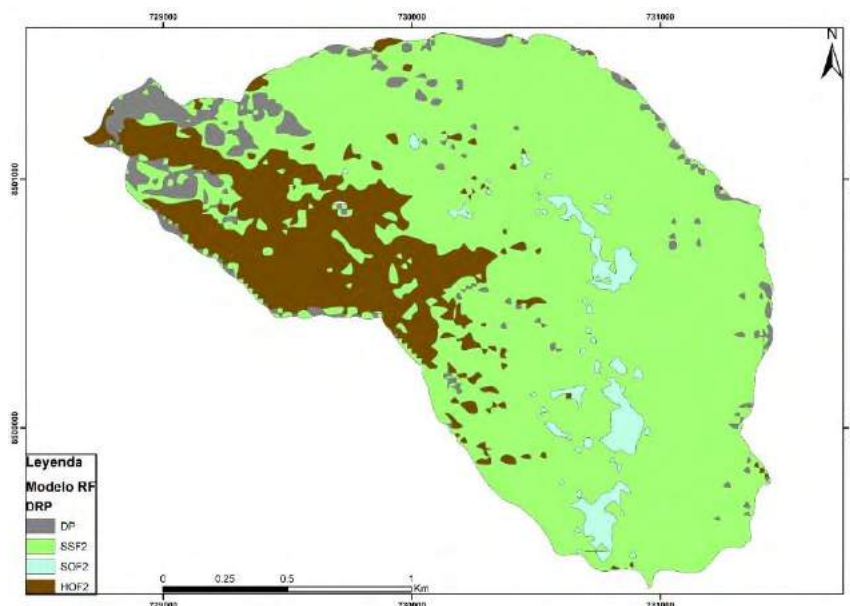


Figura 42: Modelo DRP – RF

Fuente: mapa obtenido a partir del modelo RF

4.4.3. Algoritmo de Maquinas de Vectores de Soporte (SVM)

A partir del modelo SVM se identificó para la zona de estudio, 4 tipos de procesos de escorrentías dominantes: Percolación Profunda (DP), Flujo Subterráneo retardado (SSF2), Flujo Terrestre Saturado retardado (SOF2) y Flujo Hortoniano retardado (HOF2). El tipo de escorrentía dominante con mayor presencia en la zona de estudio es el SSF2 con 64.2%, seguido del HOF2, DP y SOF2 con 20.2%, 10.7% y 4.8% respectivamente (figura 43).

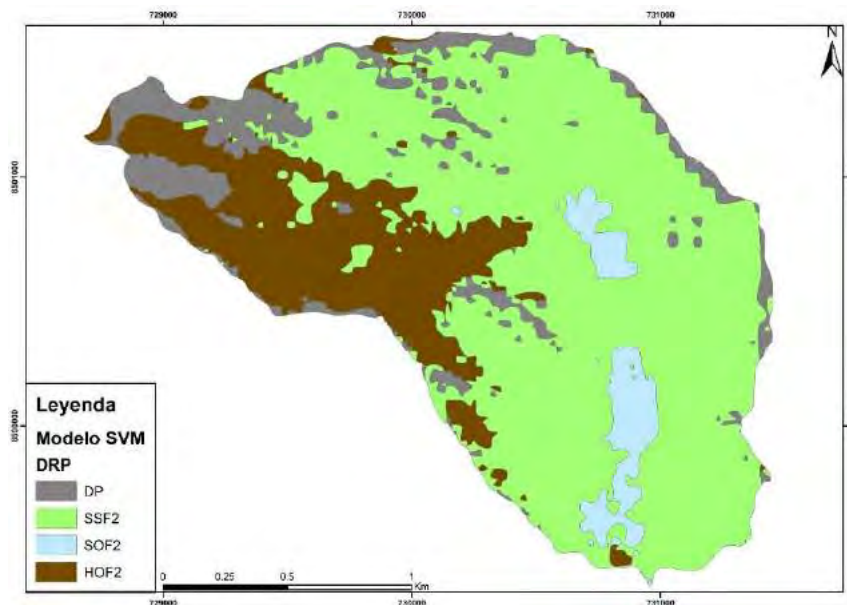


Figura 43: Modelo DRP – SVM.

Fuente: mapa obtenido a partir del modelo SVM

Discusiones

Antonetti et al (2016) a partir del uso de un enfoque manual, identificaron que en dos cuencas pequeñas de Plateau (Suiza), ubicados a una altura entre 409 a 850 m. con cobertura dominada por pastizales, existen 4 clases de DRP (DP, SSF3, SSF2, SOF2); la presente investigación coincide en que los enfoques manuales son fiables y robustos, pero lentos, sin embargo, se mejoró la escala de trabajo generando data de mayor precisión en campo, obteniendo recursos disponibles para un mejor mapeo de los procesos de escorrentías dominantes. Por lo que, a partir de 30 puntos evaluados en campo, para un área de 346 ha con una topografía accidentada (3885 – 4440 m.), se identificó 5 clases de DRP (HOF2, SOF2, SSF1, SSF2 y DP), siendo menores clases respecto a Muller et al (2009), quienes realizaron su investigación en Renania-Palatinado (Alemania), trabajando sus modelos a partir de 7 clases (HOF1, SOF1, SOF2, SOF3, SSF1, SSF2, SSF3).

Schmocker et al (2007), identificaron 5 clases (HOF1, SOF1, SOF2, SOF3, SSF3) partir de 43 perfiles de suelos ubicados en dos cuencas a 30 km al noreste de Zúrich (Suiza), los procedimientos para obtener datos en campo fueron utilizados en nuestra zona de estudio, existiendo dificultades en el momento de la replicación, esto debido a la topografía abrupta, sin embargo, la presente investigación permitió definir adaptar los procedimientos y desarrollar formatos en la toma de datos para ecosistemas ubicados por encima de los 4000 m..

Otto et al (2011) y García y Otto (2015), utilizan el NDVI para la diferenciación ecohidrológica del paisaje y un índice de humedad del suelo para cuantificar la extensión espacial de tipos y sub tipos de los humedales altoandinos. La presente investigación identificó que el índice SAVI, a partir del factor de corrección ($L=0.5$), corrige el brillo ocasionado por el suelo para diferenciar las escorrentías dominantes en cabecera de cuenca, permitiendo discriminar mejor la cobertura vegetal. Sin embargo, el enfoque aplicado solo permite identificar el 46.8 % de los DRP, valor explicado que es superado por el enfoque geo estadístico (Müller et al., 2009; P Schmocker et al., 2007) que se aplicó en cuencas a micro escala y mesoescala con un nivel de precisión aceptable 79% y 81% respectivamente.

Serrano et al (2013), sostienen que existe una relación inversa lineal entre el grado de cobertura vegetal y la escorrentía, enunciado que fue ratificado en la presente investigación al identificar que existe una relación inversa entre el índice espectral y las escorrentías dominantes, donde el tipo de vegetación de puna húmeda abierto tendría mejor predisposición para la escorrentía de tipo Hortoniano (HOF), y los matorrales de *Baccharis* a través del sistema complejo de macroporos y raíces, serían mejores indicadores de procesos de infiltración (SSF).

Fagbohun et al (2017), utilizan como método automatizado la geo estadística básica, y un enfoque automatizado que combina información de permeabilidad del sustrato, pendiente y uso de suelos, apoyado en plataformas de Sistemas de Información Geográfica, logrando identificar cuatro tipos de escorrentías dominantes: HOF (33.5%), DP (32.3%), SSF (20.4%) y SOF (13.7%). En la presente investigación, se identificó cuatro tipos de escorrentías dominantes: Flujo Terrestre Saturado (SOF), Flujo Terrestre Hortoniano (HOF), Flujo Subterráneo (SSF) y Percolación Profunda (DP). Sin embargo, los diversos enfoques de mapeo DRP difieren con respecto al tiempo, espacio y los datos requeridos para cartografía, coincidiendo con Antonetti et al (2016), quienes mencionan que los modelos basados en el uso de sistemas de información geográfica presentan diferencias en inexactitud y resolución, respecto al método manual.

CONCLUSIONES

Después de realizar la presente investigación se llega a las siguientes conclusiones:

- De los tres Índices espectrales de vegetación, el NDVI junto al MAVI resultan ser eficientes en un 67.7%, siendo la banda del infrarrojo cercano, la que permite distinguir entre procesos de escorrentías dominantes.
- Los tipos de Escorrentías Dominantes identificados a partir de un procedimiento manual estandarizado en campo, fueron Flujo Terrestre Hortoniano Retardado (HOF2 = 7%), Flujo Terrestre Saturado Retardado (SOF2 = 17%), Flujo Subsuperficial Retardado (SSF2 = 73%) y Percolación Profunda (DP = 3%).
- Se identificó el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), Índice de Suelo Desnudo (BSI) e Índice de Vegetación Ajustado a la Humedad MAVI, y que mediante su perfil espectral se identificó que la banda del infrarrojo cercano permite distinguir entre los diferentes tipos de escorrentías dominantes.
- El algoritmo de Bosque Aleatorio (RF) y Maquinas de Vectores de Soporte (SVM), presentan una exactitud de 67% para clasificar ecohidrológicamente el área de estudio, a diferencia del algoritmo de Redes Neuronales (NNT), cuya exactitud es del 56%, no logrando clasificar el Flujo Terrestre Hortoniano Retardado (HOF2).
- Se identificó el Flujo Terrestre Hortoniano (HOF2 = 16.6%), Flujo Terrestre Saturado (SOF2 = 3.2%), Flujo Subsuperficial (SSF2 = 75.7%) y Percolación Profunda (DP = 4.5%).

RECOMENDACIONES

1. Realizar un monitoreo permanente de los procesos de escorrentías dominantes a partir de procedimientos manuales, en la zona de estudio, para generar información hidrológica de escorrentías a largo plazo.
2. Generar modelos automáticos para identificar procesos de escorrentías dominantes, combinando parámetros de permeabilidad del sustrato, pendiente y uso de suelo, enfocándose en ecosistemas de Alta Montaña.
3. Utilizar imágenes satelitales de sensores remotos con mejor resolución, como es el caso del satélite peruano Perú - Sat, para una mejor discriminación del índice espectral de vegetación y la relación con los procesos de escorrentías dominantes.
4. Complementar y mejorar la resolución de la información base (p. ej. mapas de uso de suelo, mapas geológicos, mediciones continuas in situ, de los principales parámetros climatológicos e hidrológicos) para obtener modelos de mayor precisión.
5. Que las instituciones ejecutoras de proyectos en ecosistemas altoandinos y generadoras de información, como la Autoridad Nacional del Agua (ANA), Gobierno Regional de Apurímac, Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña (INAIGEM) y las universidades locales, repliquen y mejoren la investigación en otras cuencas, para obtener información hidrológica básica que relacione los procesos de escorrentías dominantes y los índices espectrales de vegetación, para apoyar la planificación y gestión del recurso suelo y agua.

BIBLIOGRAFÍA

- Abbott, B. W., Bishop, K., Zarnetske, J. P., Minaudo, C., Chapin, F. S., Krause, S., Hannah, D. M., Conner, L., Ellison, D., Godsey, S. E., Plont, S., Marçais, J., Kolbe, T., Huebner, A., Frei, R. J., Hampton, T., Gu, S., Buhman, M., Sara Sayedi, S., ... Pinay, G. (2019). Human domination of the global water cycle absent from depictions and perceptions. *Nature Geoscience*, 12(7), 533–540. <https://doi.org/10.1038/s41561-019-0374-y>
- Adams, J., & Gillespie, A. (2006). *Remote sensing of landscapes with Spectral Images: A Physical Modeling Approach*.
- Aguilar, J. (2016). *Análisis comparativo de índices de vegetación para la identificación de la variación espectral de las coberturas naturales a partir de imágenes LandSat 8*. <https://repository.udistrital.edu.co/handle/11349/5076>
- Alatorre, L., Beguería, S., & Vicente, M. (2010). Análisis de la evolución espacio-temporal del NDVI sobre áreas vegetadas y zonas de riesgo de erosión en el Pirineo central. *Ecología de Montaña*, 165(165), 7–27. <https://doi.org/10.3989/Pirineos.2010.165001>
- ANA. (2012). Delimitación y codificación de unidades hidrográficas del Perú. In *Dirección De Conservación Y Planeamiento De Los Recursos Hídricos*. <https://repositorio.ana.gob.pe/handle/20.500.12543/597>
- Anchelia, D. (2020). *Determinación de zonas susceptibles a inundaciones y análisis comparativo del Proceso de Análisis Jerárquico (AHP) y Random Forest (RF). Caso estudio : cuenca baja del río Chancay Lambayeque*. Universidad Nacional Mayor de San Marcos.
- Angelone, S., Garibay, M., & Cahuapé, M. (2006). *Permeabilidad de suelos*. Universidad Nacional de Rosario.
- Antonetti, M., Buss, R., Scherrer, S., Margreth, M., & Zappa, M. (2016). Mapping dominant runoff processes: An evaluation of different approaches using similarity measures and synthetic runoff simulations. *Hydrology and Earth System Sciences*, 20(7), 2929–2945. <https://doi.org/10.5194/hess-20-2929-2016>
- Aponte-Saravia, J., & Ospina-Noreña, J. E. (2019). Evaluando el desempeño de índices espectrales para identificar humedales alto andinos. *Revista de Teledetección*, 53, 59. <https://doi.org/10.4995/raet.2019.10580>
- Asbjornsen, H., Goldsmith, G. R., Alvarado, M. S., Rebel, K., Osch, F. P. Van, Rietkerk, M., Geissert, D. R., Chen, J., Gotsch, S., Tobo, C., Vache, K., & Dawson, T. E. (2011). Ecohydrological advances and applications in plant – water relations research : a review. *Journal of Plant Ecology*, 4(1–2), 3–22. <https://doi.org/10.1093/jpe/rtr005>
- Aybar, C., & Lavado, W. (2017). *Atla de zonas de vida del Perú: Guía explicativa. Nota técnica N° 003. Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú. Dirección de Hidrología. Lima - Perú*.
- Baiker, J. (2011). *Guía ecoturística: Mancomunidad Saywite-Choquequirao-Ampay (Apurímac, Perú). Con especial referencia a la identificación de fauna, flora, hongos y líquenes en el departamento de Apurímac y sitios adyacentes en el departamento de Cusco. Serie Investigación*.
- Bannari, A., Morin, D., Bonn, F., & Huete, A. R. (1995). A review of vegetation indices. *Remote Sensing Reviews*, 13(1–2), 95–120. <https://doi.org/10.1080/02757259509532298>
- Beretta, A., Bassahun, D., Musselli, R., & Torres, D. (2015). Medición de pH del suelo con papel reactivo. *Agriociencia Uruguay*, 19, 74.
- Bisdorf, E. B. A., Dekker, L. W., & Schoute, J. F. T. (1993). Water repellency of sieve fractions from sandy soils and relationships with organic material and soil structure. *Geoderma*, 56(1–4), 105–118. [https://doi.org/10.1016/0016-7061\(93\)90103-R](https://doi.org/10.1016/0016-7061(93)90103-R)
- Blume, T., Zehe, E., & Bronstert, A. (2008). Investigation of runoff generation in a pristine,

- poorly gauged catchment in the Chilean Andes II: Qualitative and quantitative use of tracers at three spatial scales. *Hydrological Processes*, 3688(2), 3676–3688. <https://doi.org/10.1002/hyp>
- Bravo, N. (2017). *Teledetección espacial. Landsat, Sentinel 2, Aster LIT y Modis*.
- CAN. (2009). *Atlas de los Andes del Norte y Centro. Comunidad Andina*.
- Chuvieco, E. (2008). *Teledetección Ambiental. La observación de la tierra desde el espacio. 3ra ed.* Ariel S.A.
- Conza, C. (2020). *Evaluación de la composición florística del bofedal Yurqccasa en la Zona de Amortiguamiento del Santuario Nacional de Ampay, Abancay - Apurímac*. Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco.
- Crockford, R. H., & Richardson, D. P. (2000). Partitioning of rainfall into throughfall, stemflow and interception effect of forest type, ground cover and climate. *Hydrological Processes*, 14(16–17), 2903–2920. [https://doi.org/10.1002/1099-1085\(200011/12\)14:16/17<2903::AID-HYP126>3.0.CO;2-6](https://doi.org/10.1002/1099-1085(200011/12)14:16/17<2903::AID-HYP126>3.0.CO;2-6)
- Elosegi, A., & Sabater, S. (2009). *Conceptos y técnicas en ecología fluvial* (F. BBVA (ed.); 1ra ed.).
- Esparza, J. (2013). *Contraste espacio - temporal de indicadores de interés hidrológico derivados desde teledetección*. Universidad Politécnica de Cartagena.
- Fagbohun, B. J., Olabode, O. F., Adebola, A. O., & Akinluyi, F. O. (2017). GIS-Based Sub-Basin Scale Identification of Dominant Runoff Processes for Soil and Water Management in Anambra Area of Nigeria. *Contemporary Trends in Geoscience*, 6(2), 80–93. <https://doi.org/10.1515/ctg-2017-0007>
- FAO. (2015). *Base referencial mundial del recurso suelo 2014 Sistema internacional de clasificación de suelos. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura*.
- García, A., Roldán, J., Estévez, J., Moreno, F., Serrat, A., González, J., Francés, F., Olivera, F., Castro, O., & Giráldez, J. (2014). La Hidrología y su papel en Ingeniería del Agua Hydrology and its role in water engineering. *Ingeniería Del Agua*, 18, 1–14. <https://doi.org/10.4995/ia.2014.3048>
- García, A., Torrent, J., López, M., & Del Campo, A. (2011). Influencia de la vegetación en el ciclo hidrológico, factores escorrentía e infiltración. *Cuad. Soc. Esp. Cien. For*, 32, 137–143. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4244343>
- García, E., & Otto, M. (2015). Caracterización ecohidrológica de humedales alto andinos usando imágenes de satélite multitemporales en la cabecera de cuenca del río Santa, Ancash, Perú. *Ecología Aplicada*, 14(2), 12.
- Gharari, S., Hrachowitz, M., Fenicia, F., & Savenije, H. H. G. (2011). Hydrological landscape classification: Investigating the performance of HAND based landscape classifications in a central European meso-scale catchment. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(11), 3275–3291. <https://doi.org/10.5194/hess-15-3275-2011>
- Gonzaga, C. (2014). Aplicación de Índices de Vegetación Derivados de Imágenes Satelitales Landsat 7 ETM+ y ASTER para la Caracterización de la Cobertura Vegetal en la Zona Centro de la Provincia De Loja, Ecuador [Universidad Nacional de la Plata]. In *Universidad Nacional de la Plata*. <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/34487>
- González-Barrios, J. L., González-Cervantes, G., & Chávez-Ramírez, E. (2012). Porosidad del suelo en tres superficies típicas de la cuenca alta del río Nazas. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, III(1), 21–32. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222012000100002
- González, F., Ruíz, J., & Marqués, F. (2013). *Tutorial de Teledetección Espacial. Telecan. Universidad de las Palmas de Gran Canaria*.

- GoreApurímac. (2010). *Zonificación Ecológica Económica de la región Apurímac*. Gobierno Regional de Apurímac.
- Hernández, R., & Mendoza, C. (2018). *Metodología de la investigación: Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta* (7th ed.). McGRAW - HILL/ INTERAMERICANA EDITORES S.S.
- Ibañez, S., Moreno, H., & Blanquer, J. (2012). *Características del infiltrómetro de doble anillo (Anillo de Munz)*.
- Jimeno, P. (2018). *Simulación de procesos hidrológicos utilizando técnicas de machine learning y modelos hidrológicos*. Universidad Católica de Murcia.
- Kuchler, A. W., Mueller-Dombois, D., & Ellenberg, H. (1976). Aims and Methods of Vegetation Ecology. *Geographical Review*, 66(1), 114. <https://doi.org/10.2307/213332>
- Manta, M. (2008). *Diagnostico sobre la situación de riesgos y conocimientos en prevención, control y contingencia de incendios dentro de las áreas de trabajo del programa ECOBONA*.
- Martínez, Y., & Villalejo, V. (2019). Ecohidrología-Ecohidráulica: claves para la gestión integrada de los recursos hídricos. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 40 (2)(2), 95–109. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1680-03382019000200095
- Matteucci, S., & Colma, A. (1982). *Metodología para el estudio de la vegetación*. Secretaria General de la Organización de los Estados Americanos. Programa de Desarrollo Científico y Tecnológico.
- MINAM. (2014). Guía para muestreo de suelos. *Ministerio Del Ambiente*, 38. http://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2014/04/GUIA-MUESTREO-SUELO_MINAM1.pdf
- MINAM. (2019). Mapa Nacional de Ecosistemas del Perú - Memoria Descriptiva. *Ministerio Del Ambiente*, 1–119. <https://sinia.minam.gob.pe/mapas/mapa-nacional-ecosistemas-peru>
- Montenegro, A. (2018). *Comparación de metodologías de evaluación botánica en un bofedal en el distrito de Carapoma, Huarochirí - Lima*. Universidad Nacional Agraria la Molina.
- Moreno, L. (2008). *Evaluación de pérdidas de agua y parámetros hidráulicos mediante ensayos de infiltración en campo*. 2008.
- Mosquera, G. M., Marín, F., Stern, M., Bonnesoeur, V., Ochoa-tocachi, B. F., Romándañobeytia, F., & Crespo, P. (2021). Science of the Total Environment Progress in understanding the hydrology of high-elevation Andean grasslands under changing land use. *Science of the Total Environment*, 804, 14. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150112>
- Mueller, U., Devignot, O., & Pessiot, L. (2019). *Sen2Cor configuration and user manual* (Issue 2).
- Müller, C., Hellebrand, H., Seeger, M., & Schobel, S. (2009). Identification and regionalization of dominant runoff processes - A GIS-based and a statistical approach. *Hydrology and Earth System Sciences*, 13(6), 779–792. <https://doi.org/10.5194/hess-13-779-2009>
- Newman, B. D., Wilcox, B. P., Archer, S. R., Breshears, D. D., Dahm, C. N., Duffy, C. J., McDowell, N. G., Phillips, F. M., Scanlon, B. R., & Vivoni, E. R. (2006). Ecohydrology of water-limited environments: A scientific vision. *Water Resources Research*, 42(6), 1–15. <https://doi.org/10.1029/2005WR004141>
- Otto, M., Scherer, D., & Richters, J. (2011). Hydrological differentiation and spatial distribution of high altitude wetlands in a semi-arid Andean region derived from satellite data. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(5), 1713–1727.

- <https://doi.org/10.5194/hess-15-1713-2011>
- Pérez-Suárez, M., Arredondo-Moreno, J. T., Huber-Sannwald, E., & Serna-Pérez, A. (2014). Forest structure, species traits and rain characteristics influences on horizontal and vertical rainfall partitioning in a semiarid pine-oak forest from Central Mexico. *Ecohydrology*, 7(2), 532–543. <https://doi.org/10.1002/eco.1372>
- Ran, G., Jian, S., Wu, Q., Zhang, L., & Hu, C. (2020). Exploring the dominant runoff processes in two typical basins of the yellow river, china. *Water (Switzerland)*, 12(11), 1–17. <https://doi.org/10.3390/w12113055>
- Rodríguez, A., Aristizábal, A., & Camacho, J. (2008). Variabilidad espacial de los modelos de infiltración de Philip y Kostiaikov en un suelo ándico. *Eng. Agric. Jaboticabal*, 28, 64–75.
- Rugnitz, M., Chacón, M., & Porro, R. (2009). *Guía para la determinación de carbono en pequeñas propiedades rurales. Centro Mundial Agroforestal (ICRAF/ Consorcio Iniciativa Amazónica (IA))* (1st ed.).
- Scherrer, S., & Naef, F. (2003). A decision scheme to indicate dominant hydrological flow processes on temperate grassland. *Hydrological Processes*, 17(2), 391–401. <https://doi.org/10.1002/hyp.1131>
- Schmocker, P., Naef, F., & Scherrer, S. (2007). Identifying runoff processes on the plot and catchment scale. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11(2), 891–906. <https://doi.org/10.5194/hess-11-891-2007>
- Schmocker, Petra. (2004). *A method to delineate runoff processes in a catchment and its implications for runoff simulations* [Swiss Federal Institute of Technology Zurich]. <https://doi.org/10.3929/ethz-a-004836815>
- SENAMHI. (2002). *Indicadores adaptados a las características climáticas del Perú*.
- SERNANP. (2016). *Plan maestro del Santuario Nacional de Ampay 2015-2019*.
- Serrano, P., Nadal, E., & Lana, N. (2014). La relación suelo - vegetación y su influencia en el comportamiento hidrológico de distintos ambientes vegetales. *Geoecología, Cambio Ambiental y Paisaje*, 217–228.
- Shai, S., & Shai, B. (2014). *Understanding Machine Learning: From Theory to Algorithms* (1ra ed.). <http://www.cs.huji.ac.il/~shais/UnderstandingMachineLearning>
- Tobón, C. (2009). *Los bosques andinos y el agua. Serie investigación y sistematización #4. Programa Regional ECOBONA – INTERCOOPERATION, CONDESAN. Quito*.
- Tupin, F., Inglada, J., & Nicolas, J. (2014). *Remote Sensing Imagery* (Wiley (ed.)).
- USDA. (1999). *Guía para la Evaluación de la Calidad y Salud del Suelo. Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de Norteamérica*.
- Valencia, J., & Tobón, C. (2017). Influencia de la vegetación en el funcionamiento hidrológico de cuencas de humedales de alta montaña tropical. *Ecosistemas*, 26(2), 10–17. <https://doi.org/10.7818/ECOS.2017.26-2.02>
- Valencia Leguizamon, J., & Tobón Marín, C. (2017). Influence of vegetation on the hydrological functioning of tropical high mountain wetlands basins. *Ecosistemas*, 26(2), 10–17. <https://doi.org/10.7818/ecos.2017.26-2.02>
- Valenzuela, J. (2016). *Guía de aves del Santuario Nacional de Ampay. Servicio Nacional de Áreas Naturales Protegidas por el Estado y Programa Bosques Andinos*.
- Villacorta, S., Peña, F., Jaimes, F., Sosa, N., Condori, E., Pari, W., Luza, C., & Rodríguez, C. (2019). *Evaluación integral de la cuenca del río Mariño (Abancay, Apurímac) para la prevención de desastres de origen geológico y geo-hidrológico. INGEMMET, Boletín, Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica, 71 (Issue)*.
- Villón, M. (2011). *Hidrología* (Maxsof (ed.); 2nd ed.).
- WMO. (2012). *Glosario hidrológico internacional. Organización Meteorológica del Agua*.
- Zalewski, M., Janahuer, G., & Jolánkai, G. (1997). *Ecohydrology* (Vol. 13, Issue April).

- Zhang, J., Jiao, J. J., & Yang, J. (2000). In situ rainfall infiltration studies at a hillside in Hubei Province, China. *Engineering Geology*, 57(1–2), 31–38. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(99\)00126-X](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(99)00126-X)
- Zhu, G., Ju, W., Chen, J. M., & Liu, Y. (2014). A novel Moisture Adjusted Vegetation Index (MAVI) to reduce background reflectance and topographical effects on LAI retrieval. *PLoS ONE*, 9(7), 1–15. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0102560>

Páginas web visitadas

<https://www.copernicus.eu/es> (Agencia espacial Europea)

<https://www.senamhi.gob.pe/?p=estaciones> (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología)

ANEXOS

Anexo 1: Matriz de consistencia de la investigación.

TITULO:I. Eficiencia de los Índices de Vegetación Espectral para identificar Procesos de Escorrentías Dominantes, en la quebrada Arapato, distrito de Tamburco, provincia de Abancay, Región de Apurímac.					
MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL	FORMULACION DEL PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES	DISEÑO METODOLÓGICO
Antecedentes de investigación:	Problema general	Objetivo general	Hipótesis general	VARIABLE A	Enfoque de la Investigación
Fagbohun et al (2017)	¿Cuál será la eficiencia de los Índices de vegetación espectral para la identificación de Procesos de escorrentías dominantes, en la quebrada Arapato, distrito de Tamburco, provincia de Abancay, Región de Apurímac?	Determinar la eficiencia de los Índices Espectrales de Vegetación para la identificación de Procesos de escorrentías dominantes, en la quebrada Arapato, distrito de Tamburco, provincia de Abancay, Región de Apurímac.	No aplica	Índices Espectrales de Vegetación	Cuantitativo
Antonetti et al (2016)				Dimensiones	Nivel de la Investigación
Muller et al (2009)				Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)	Descriptivo
(García y Otto, 2015)				Índice de Suelo Desnudo (BSI)	Tipo de investigación
Otto et al (2011)				Índice de Vegetación Ajustado a la Humedad (MAVI)	Aplicada
Schmocker et al (2007)					Unidad de Análisis
					Vegetación : Parcelas de 1 m2, 25 m2.
					Suelos: Parcelas de 1m2
					Infiltración: Doble anillo de infiltración
Bases teóricas	Problemas específicos	Objetivos específicos	Hipótesis específicas	VARIABLE B	Escorrentía: Simulador de escorrentía
Ciclo hidrológico	1. ¿Cuáles son los tipos de Escorrentías Dominantes obtenidos a partir de un procedimiento manual estandarizado en campo.?	1. Identificar los tipos de escorrentías dominantes a partir de un procedimiento manual estandarizado en campo.	No aplica	Procesos de escorrentías dominante	Población de estudio
Ecosistemas altoandinos				Dimensiones	Quebrada Arapato
Procesos de escorrentías Dominantes				Vegetación	Técnica de selección de muestra
Teledetección				Suelos	No probabilístico por conveniencia
Aprendisaje Automático				Pendientes	Tamaño de muestra
				Infiltración	30 puntos aleatorios
Marco Conceptual (Palabras clave):	2. ¿Cuál es el perfil espectral de los tipos de escorrentías dominantes?	2. Analizar los índices espectrales de vegetación y el perfil espectral de los tipos de escorrentías dominantes.	No aplica		Ámbito de estudio (localización política y geográfica)
Escorrentía				Escorrentía	Quebrada Arapato, Zona de Amortiguamiento del Santuario Nacional del Ampay, Distrito de Tamburco, Provincia de Abancay, Región de Apurímac.
Infiltración				Nivel del agua subterránea	
Precipitación					Técnicas de recolección de información
Satélite					Fichas de observación en campo
Escorrentía superficial					
Intercepción					
Macroporosidad					
Pastizal	3. ¿Cuál es la aplicación de algoritmos inteligentes para el reconocimiento automático de tipos de escorrentías dominantes?	3. Evaluar algoritmos inteligentes de clasificación, para el reconocimiento automático de los tipos de escorrentías dominantes.	No aplica		
Percolación					
	4. ¿Cuál es el mapa resultante de los tipos de escorrentías dominantes?	4. Mapear los tipos de escorrentías dominantes para toda la zona de estudio.	No aplica		

Fuente: elaboración propia.

Anexo 2: Operacionalización de variables.

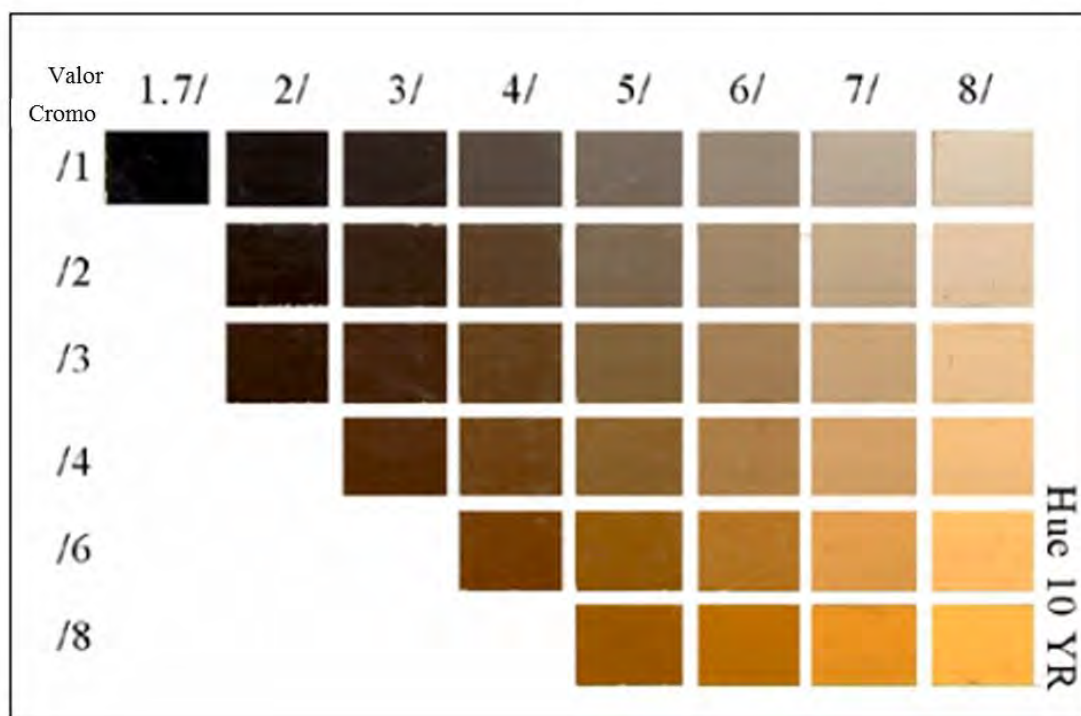
Variables Principales	Definición conceptual	Dimensiones	Indicadores	Instrumento
Índices Espectrales de Vegetación	Interacción entre las ondas electromagnéticas y la vegetación, a través de su reflectividad (Bannari et al., 1995)	NDVI	% vigorosidad de la vegetación	Sensores remotos y software especializado
		BSI	% Suelo Desnudo	Sensores remotos y Software especializado
		MAVI	% humedad de la vegetación	Sensores remotos y Software especializado
Procesos de escorrentías dominantes Manual	Formaciones de escorrentías en un suelo natural después de precipitaciones intensas (Scherrer y Naef, 2003)	Vegetación	Composición y estructura	Colectas de vegetación y Fichas estructuradas de toma de datos
		Suelos	Textura, estructura, Materia orgánica, Porosidad, Humedad relativa	Colectas de muestras de suelos y Fichas estructuradas de toma de datos
		Pendientes	% de pendientes	Fichas estructuradas de toma de datos
		Infiltración	mm/hora de agua infiltrada	Simulaciones in situ y Fichas estructuradas de toma de datos
		Escorrentía	L/seg de agua por escorrentía	Simulaciones in situ y Fichas estructuradas de toma de datos
		Nivel del agua subterránea	cm de Profundidad del flujo	Fichas estructuradas de toma de datos

Nota: NDVI= Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada, BSI= Índice de Suelo Desnudo, MAVI= Índice de Vegetación Ajustado a la Humedad.

Fuente: elaboración propia.

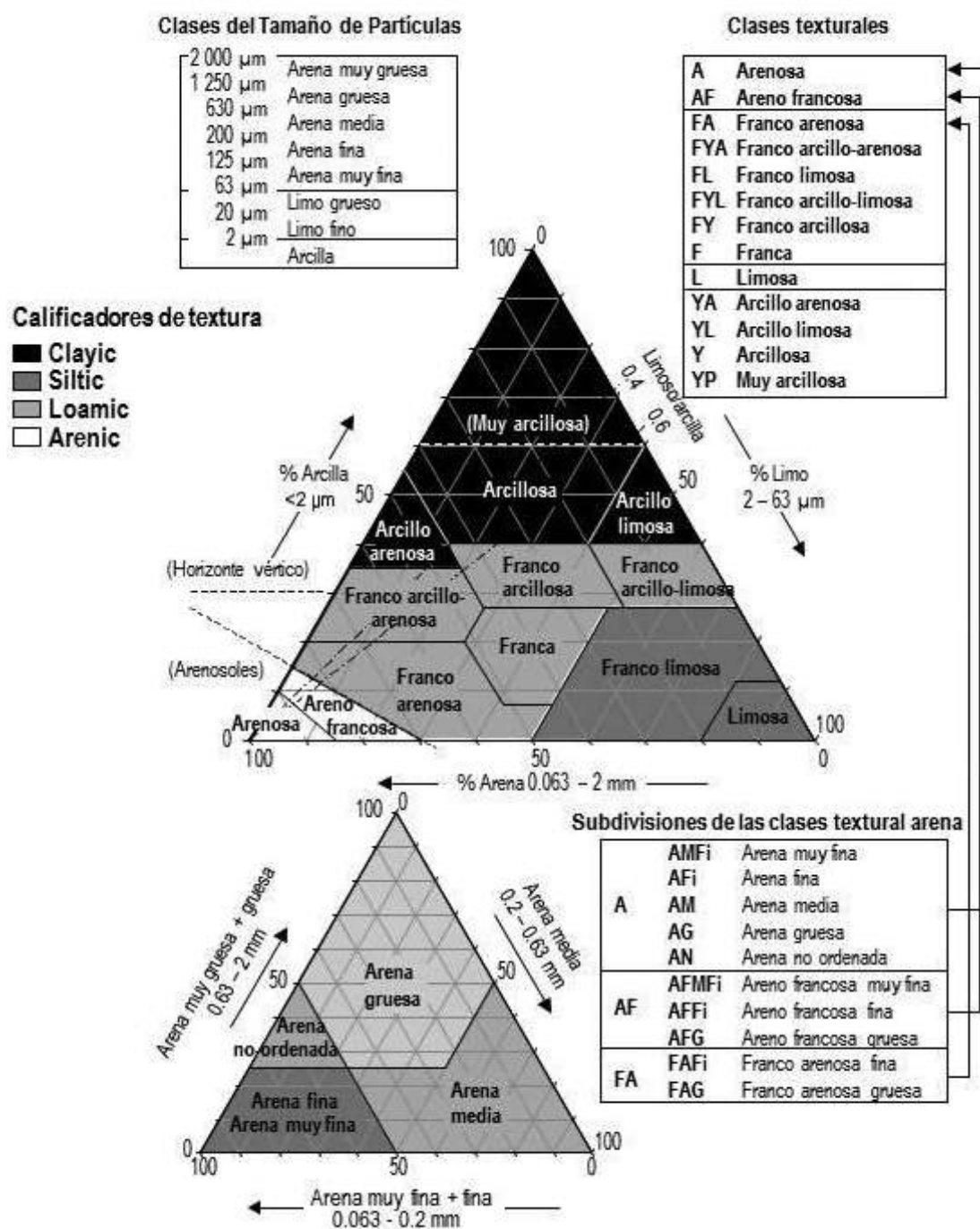
Anexo 3: Escala de Munsell 10YR.

Valor Cromo	1.7/	2/	3/	4/	5/	6/	7/	8/
/1	1.7/1 Negro	2/1	3/1	4/1 Gris pardusco	5/1	6/1	7/1 Gris claro	8/1
/2		2/2 Negro pardusco	3/2	4/2 Marrón amarillo grisáceo	5/2	6/2	7/2	8/2
/3		2/3	3/3 Oscuro... ...Marrón	4/3 Marrón amarillento opaco	5/3	6/3 Amarillo anaranjado opaco	7/3	8/3 Amarillo Claro... ... Anaranjado
/4			3/4	4/4 Marrón	5/4	6/4	7/4	8/4
/6				4/6	5/6 Amarillento	6/6 Brillante	7/6 Amarillento	8/6
/8					5/8 ...Marrón	6/8 Marrón	7/8 Amarillo naranja	8/8



Fuente: Munsell Soil Color Charts (1994).

Anexo 4: Tamaño de partículas y clases texturales.



Fuente: FAO (2009: 28).

Anexo 5: Ubicación de los puntos de evaluación y procedimientos realizados.

Código	Coordenadas UTM			Procedimientos realizados				
	Este (m)	Norte (m)	Altura (m.)	Muestreo y colecta de vegetación	Colecta y evaluación de suelos	Procesos de infiltración	Procesos de escorrentía	Tubos de observación
P1	730342	8500955	4127	x	x	x	x	x
P2	730192	8500983	4141	x	x	x	x	
P3	730321	8501140	4163	x	x	x	x	
P4	730908	8500581	4023	x	x	x	x	
P5	730990	8500457	4006	x	x	x	x	
P6	731121	8500475	4027	x	x	x	x	
P7	731077	8500332	4198	x	x	x	x	
P8	731055	8500010	4165	x	x	x	x	
P9	731008	8499831	4147	x	x	x	x	
P10	730780	8500102	4198	x	x	x	x	
P11	730720	8500635	4060	x	x	x	x	x
P12	730663	8500670	4069	x	x	x	x	
P13	729610	8501105	4266	x	x	x	x	
P14	729773	8501314	4284	x	x	x	x	
P15	729650	8501284	4299	x	x	x	x	
P16	729514	8501219	4344	x	x	x	x	
P17	729872	8500864	4365	x	x	x	x	
P18	730009	8501154	4332	x	x	x	x	
P19	730958	8500816	4077	x	x	x	x	
P20	730817	8500799	4024	x	x	x	x	
P21	730780	8500935	4044	x	x	x	x	x
P22	730613	8500792	4084	x	x	x	x	x
P23	730698	8500715	4081	x	x	x	x	x
P24	730607	8500885	4064	x	x	x	x	x
P25	730497	8500979	4099	x	x	x	x	x
P26	730636	8501395	4277	x	x	x	x	x
P27	730837	8501272	4255	x	x	x	x	x
P28	730892	8501074	4175	x	x	x	x	x
P29	730841	8501013	4108	x	x	x	x	x
P30	730745	8500694	4042	x	x	x	x	x

Fuente: elaboración propia, a partir de datos obtenidos en campo y gabinete.

Anexo 6: Formato para la evaluación de vegetación.

[illegible]

* Pendiente de la parcela (0-100%)

** Tipo de parcela: 1m2 o 25m2

*** Cobertura %: Porcentaje de cobertura vegetal en el cuadrante de 1m2

Fuente: elaboración propia.

Anexo 7: Formato para la evaluación de suelos.

Código	Profundidad (cm)	Color	Textura del suelo (%)				Estructura	Selladura de superficie del suelo	Hidrofobicidad	Macroporosidad (Mp/m2)	*Densidad aparente (g/cm3) $P2/((\pi * \sqrt{\text{rad}}))$	**% Porosidad $1-(\text{Densidad aparente}/2.65)$	Permeabilidad de la matriz	Grado de Compactación	Ph	Contenido de:		
			Arena	Limo	Arcilla	Tipo Suelo										Fragmentos gruesos	***M.O (%) (PMO/P1)*100	H° (%) (P1-P2/P2)*100

* Fórmula de la densidad aparente (P2= peso seco de la muestra (gr)) (USDA, 1999)

** Fórmula del porcentaje de porosidad (valor de la densidad real = 2.65 g/cm3) (González, 2012))

*** Fórmula de materia orgánica (PMO = Peso de materia orgánica (gr), P1= Peso húmedo de la muestra (gr)) (USDA, 1999)

***** Fórmula de porcentaje de carbono (Valor para determinar % de carbono de forma indirecta = 1.724) (Calvo, 2016)

Fuente: elaboración propia.

Anexo 8: Formato para la evaluación de infiltración.

Código	Fecha	Hora (i)	Hora (f)	Ambiente			Suelo						Anillo Doble: T (min) : H (cm)												Flujo lateral			Agua (L)	Obs
				Clima	T°C (i)	T°C (f)	T°C (i)	T°C (f)	H° % (i)		H ° % (f)		2'	4'	6'	8'	10'	15'	20'	30'	40'	50'	60'	Altura (cm)	H° %				
									1ra	2da	1ra	2da													1ra	2da			

Fuente: elaboración propia.

(i): inicio
(f): final
% H°: Porcentaje de humedad
T (min): Tiempo en minutos
H (cm): Altura de agua infiltrada en el anillo interno

Anexo 9: Formato para la evaluación de escorrentía

[illegible]

(i): inicio

(f): final

% H^o: Porcentaje de humedad

T (min): Tiempo en minutos

H (ml): Altura de agua colectada

Fuente: elaboración propia.

Anexo 10: Código en el lenguaje de programación en R

Paso 1: Instalar paquetes y cargar librerías

```
install.packages("rgdal, raster, caret, sp, nnet, randomForest, kernlab, e1017");
```

Paso 2: Listar todas las bandas Sentinel-2B del área de estudio

```
list_nm <- list.files('new_data', full.names = TRUE, pattern = '.jp2')
```

Paso 3: Cargar las bandas de la imagen Sentinel-2

```
temp_r<- list()
for(i in 1:length(list_nm)){
  temp_r[[i]] <- raster::raster(list_nm[i])}
```

Paso 4: Cargar datos obtenidos de campo

```
fieldData = rio::import('data/data_soil.csv')
samples_data <- fieldData[,1:2] # selección de coordenadas de cada punto de muestreo
```

Paso 5: Extraer los valores de cada banda

```
list_sd <- list()
for(a in 1:length(temp_r)){
  saa <- raster::extract(temp_r[[a]],samples_data) # Extraer los valores de cada banda
  df_o <- data.frame(Band = saa) # Crear un data frame por cada conjunto de datos
  list_sd[[a]] <- df_o} # Incorporar los datos en una lista de índices a
```

Paso 6: Concatenar valores por columnas

```
dCalldf <- do.call(cbind, list_sd)
```

Paso 7: Renombrar las columnas de las bandas

```
colnames(dCalldf) <- paste0('Band_',1:13)
```

Paso 8: Definir las clases para una mejor visualización

```
clases <- c('Class2', 'Class4', 'Class2', 'Class2', 'Class2', 'Class2', 'Class2', 'Class2',
'Class2', 'Class2', 'Class3', 'Class2', 'Class2', 'Class2', 'Class2', 'Class1', 'Class4', 'Class3',
'Class2', 'Class3', 'Class3', 'Class2', 'Class2', 'Class2', 'Class2', 'Class2', 'Class2', 'Class2',
'Class2', 'Class3')
```

Paso 9: Extraer los puntos de muestreo en una tabla

```
training_points <- data.frame(fieldData[,1:2])
```

Paso 10: Combinar los puntos de muestreo con la tabla de valores de Bandas (Sentinel-2B)

```
df <- data.frame(training_points, dCalldf)
```

Paso 11: Definir un perfil para graficar el espectro multitemporal (Sentinel-2B)

```

profiles <- df %>%
  as.data.frame() %>% # definir una tabla
  cbind(., classes) %>% # combinar con las clases definidas
  na.omit() %>% # eliminar los valores nulos
  group_by(classes) %>% # agrupar todos los valores en las bandas en cada clase
  summarise(Band_1 = mean(Band_1), # media de la banda 1
    Band_2 = mean(Band_2), # media de la banda 2
    Band_3 = mean(Band_3), # media de la banda 3
    Band_4 = mean(Band_4), # media de la banda 4
    Band_5 = mean(Band_5), # media de la banda 5
    Band_6 = mean(Band_6), # media de la banda 6
    Band_7 = mean(Band_7), # media de la banda 7
    Band_8 = mean(Band_8), # media de la banda 8
    Band_9 = mean(Band_9), # media de la banda 9
    Band_10 = mean(Band_10), # media de la banda 10
    Band_11 = mean(Band_11), # media de la banda 11
    Band_12 = mean(Band_12), # media de la banda 12
    Band_13 = mean(Band_13)) %>% # media de la banda 13
  as.data.frame() # Exportar como una tabla

```

Paso 12: Explorar las 4 primeras filas

```
head(profiles)
```

Paso 13: Grafico de perfil multi-espectral (Sentinel-2B)

```

profiles %>%
  select(-classes) %>% # seleccionar todas las bandas excepto la columna `classes`
  gather() %>% # reforma de columnas a filas

```

Paso 14: Crear una columna `class` para todos los valores

```

## 13, define el numero de columnas por cada clase
mutate(class = rep(c("Class1", "Class2", "Class3", "Class4"), 13)) %>%

```

Paso 15: Generar un grafico de todo el conjunto de dato utilizado como grupo y las clases la columna `class`

```

ggplot(data = ., aes(x = fct_relevel(as.factor(key)), y = value, group=class, color =
class)) + geom_point(size = 2.5) + # incorporar puntos
  geom_line(lwd = 1.2) + # incorporar lineas
  scale_color_manual(values=c('#E74C3C', '#3498DB', '#28B463', '#F1C40F')) +

```

```
labs(title = "Perfil Espectral desde imagenes Sentinel-2",
      x = "Bandas",
      y = "Valores de reflectancia") +
```

Paso 16: Configuración de la presentación de la figura

```
theme(panel.background = element_blank(), # Fondo blanco
      panel.grid.major = element_line(color = "gray", size = 0.5), # Grid
      panel.grid.minor = element_line(color = "gray", size = 0.5), # Grid
      axis.ticks = element_blank(),
      axis.text.x = element_text(angle = 90, vjust = 0.5, hjust=1)) # Nombres en vertical
```

Paso 17: Grafico de perfil multi-espectral (Sentinel-2) a nivel de densidades

```
# Lineas verticales representan la media de los valores de reflectanci
profiles %>%
  select(-classes) %>%
  gather() %>%
  mutate(class = rep(c("Class1", "Class2", "Class3", "Class4"), 13)) %>%
  ggplot(., aes(x=value, group=as.factor(class), fill=as.factor(class))) +
  geom_density(alpha = 0.75) +
  geom_vline(data = . %>% group_by(class) %>% summarise(grp.mean = mean(value)),
            aes(xintercept=grp.mean, color = class), linetype="dashed", size=1) +
  scale_fill_manual(values=c('#E74C3C', '#3498DB', '#28B463', '#F1C40F'),
                    name = "class") +
  scale_color_manual(values=c("gray", "#CD853F", "#3CB371", "#33CEFF")) +
  theme(panel.background = element_blank(),
        panel.grid.major = element_line(color = "gray", size = 0.5),
        panel.grid.minor = element_line(color = "gray", size = 0.5),
        axis.ticks = element_blank()) +
  labs(x = "Valores de reflectancia",
       y = "Densidad",
       title = "Histograma de densidades del perfil espectral")
```

Paso 18: Configurar la tabla de entrada para los datos de entrenamiento

```
# extraer una muestra
# agregar los valores de escorrentia en la columna `class`
samples <- df[,1:(ncol(df))]
samples$df <- fieldData$DRPV
```

```
names(samples)[16] <- 'class'
```

Paso 19: Separar los datos en 80% para entrenamiento y 20% para evaluacion

```
trainx = list(0)
```

```
evalx = list(0)
```

```
for (i in 1:4){ # loop a traves de las cuatro clases, [4] define el numero de clases
```

```
  cls = samples[samples$class == i,]
```

```
  smpl <- floor(0.75 * nrow(cls)) # extraer una muestra del 80%
```

```
  tt <- sample(seq_len(nrow(cls)), size = smpl)
```

```
  trainx[[i]] <- cls[tt,]
```

```
  evalx[[i]] <- cls[-tt,]}
```

Paso 20: Combiar todos los valores en una tabla de datos de entrenamiento y de evaluacion

```
trn = do.call(rbind, trainx)
```

```
eva = do.call(rbind, evalx)
```

Paso 21: Configurar el metodo de re muestreo in el proceso de modelo de entrenamiento

```
tc <- trainControl(method = "repeatedcv", # metodo `cross-validation` del modelo de  
entrenamiento
```

```
  number = 10, # numero de cajas
```

```
  repeats = 5, # numero de repeticiones
```

```
  allowParallel = TRUE, # permitir el uso del nucles del procesado
```

```
  verboseIter = TRUE) # ver las iteraciones
```

Paso 22: Generar una busqueda de cuadrante por cada valor del parametro para la inclusion del modelo

```
# Estos valores del parametro son ejemplos para este caso (clasificacion de escorrentias).
```

```
# Se puede definir el parametro mucho mas complejo para mejorar la precision del  
analisis
```

```
# configuracion de cada algoritmo
```

```
nnet.grid = expand.grid(size = seq(from = 2, to = 10, by = 2), # numero de unidades de  
neuronas como archivo oculto
```

```
  decay = seq(from = 0.1, to = 0.5, by = 0.1)) # parametro de regularizacion  
para evitar el sobre ajuste
```

```
rf.grid <- expand.grid(mtry=1:20) # numero de variables para cada node del arbol
```



```
svm.grid <- expand.grid(sigma=seq(from = 0.01, to = 0.10, by = 0.02), # controles no  
lineales en el hiperplano
```

```
          C=seq(from = 2, to = 10, by = 2)) # control de influencia de cada vector
```

Paso 22: Inicio de los modelos de entrenamiento

Entrenamiento del modelo de redes neuronales

```
MoasdlIn <- trn[, (4:ncol(trn)-1)]
```

```
nnet_model <- caret::train(x = MoasdlIn, y = as.factor(as.integer(as.factor(trn$class))),  
                          method = "nnet", metric="Accuracy", trainControl = tc, tuneGrid =  
nnet.grid) # metodo `nnet`
```

Entrenamiento del modelo de random forest

```
rf_model <- caret::train(x = MoasdlIn, y = as.factor(as.integer(as.factor(trn$class))),  
                         method = "rf", metric="Accuracy", trainControl = tc, tuneGrid = rf.grid)  
# metodo `rg`
```

Entrenamiento del modelo de support vector machines

```
svm_model <- caret::train(x = MoasdlIn, y = as.factor(as.integer(as.factor(trn$class))),  
                          method = "svmRadialSigma", metric="Accuracy", trainControl = tc,  
tuneGrid = svm.grid) # metodo `svm`
```

Paso 23: Ajustando la resolucion espacial a 10 m

```
Band_1 <- raster::disaggregate(temp_r[[1]], 6) # transformar de 60m a 10m
```

```
Band_2 <- temp_r[[2]] # Conserva 10m
```

```
Band_3 <- temp_r[[3]] # Conserva 10m
```

```
Band_4 <- temp_r[[4]] # Conserva 10m
```

```
Band_5 <- raster::disaggregate(temp_r[[5]], 2) # transformar de 20m a 10m
```

```
Band_6 <- raster::disaggregate(temp_r[[6]], 2) # transformar de 20m a 10m
```

```
Band_7 <- raster::disaggregate(temp_r[[7]], 2) # transformar de 20m a 10m
```

```
Band_8 <- temp_r[[8]] # Conserva 10m
```

```
Band_9 <- raster::disaggregate(temp_r[[9]], 6) # transformar de 60m a 10m
```

```
Band_10 <- raster::disaggregate(temp_r[[10]], 6) # transformar de 60m a 10m
```

```
Band_11 <- raster::disaggregate(temp_r[[11]], 2) # transformar de 20m a 10m
```

```
Band_12 <- raster::disaggregate(temp_r[[12]], 2) # transformar de 20m a 10m
```

```
Band_13 <- raster::disaggregate(temp_r[[13]], 2) # transformar de 20m a 10m
```

Paso 24: Preparar Conjunto de raster para la proyeccion

```
s2data <- raster::stack(Band_1, Band_2, Band_3, Band_4, Band_5, Band_6,  
                         Band_7, Band_8, Band_9, Band_10, Band_11, Band_12, Band_13)
```

```
names(s2data) <- paste0('Band_',1:13) # renombrar las variables como `Band_1`,  
`Band_2`, etc
```

Paso 25: Aplicar los modelos en los datos.

Aplicar el modelo de redes neuronales a los datos Sentinel-2.

```
nnet_prediction = raster::predict(s2data, model=nnet_model)
```

Aplicar el modelo random forest a los datos Sentinel-2.

```
rf_prediction = raster::predict(s2data, model=rf_model)
```

Aplicar el modelo support vector machine a los datos Sentinel-2.

```
svm_prediction = raster::predict(s2data, model=svm_model)
```

Paso 26: Mostrar mapas

```
plot(nnet_prediction, main='nnt algorithm')
```

```
plot(rf_prediction, main='rf algorithm')
```

```
plot(svm_prediction, main='svm algorithm')
```

Paso 27: Convertir los datos de evaluacion en espacial para extraer los valores de escorrentia

```
eva.sp = SpatialPointsDataFrame(coords = cbind(eva$x, eva$y), data = eva)
```

Paso 28: Extraer valores para el muestreo

neural network

```
nnet_Eval = raster::extract(nnet_prediction, eva.sp)
```

random forest

```
rf_Eval = raster::extract(rf_prediction, eva.sp)
```

support vector machines

```
svm_Eval = raster::extract((svm_prediction), eva.sp)
```

Paso 29: Crear matriz de confusion

```
nnet_errorM = confusionMatrix(as.factor(nnet_Eval), as.factor(eva$class)) #
```

```
rf_errorM = confusionMatrix(as.factor(rf_Eval),as.factor(eva$class))
```

```
svm_errorM = confusionMatrix(as.factor(svm_Eval),as.factor(eva$class))
```

```
writeRaster(nnet_prediction, 'nnt_algorithm')
```

```
writeRaster(rf_prediction, 'rf_algorithm')
```

```
writeRaster(svm_prediction, 'svm_algorithm')
```

```
nnet_errorM = confusionMatrix(as.factor(nnet_Eval), as.factor(eva$class)) #
```

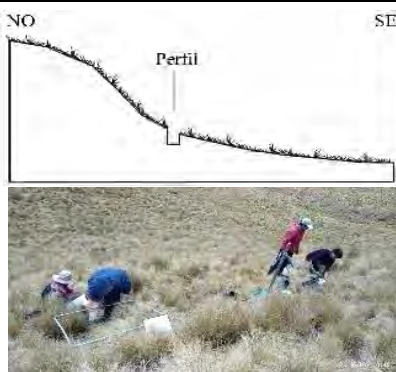
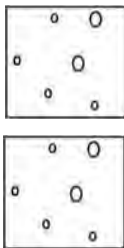
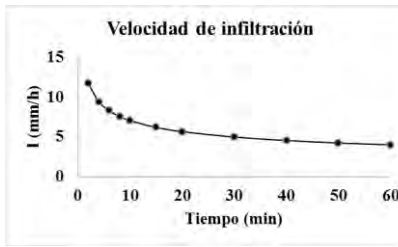
```
rf_errorM = confusionMatrix(as.factor(rf_Eval),as.factor(eva$class))
```

```
svm_errorM = confusionMatrix(as.factor(svm_Eval),as.factor(eva$class))
```

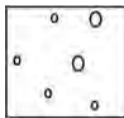
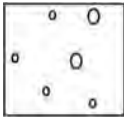
Anexo 11: Perfiles de suelo

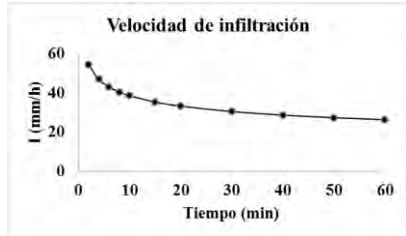
PERFIL DE SUELO: P 2									
Descripción del lugar				Superficie del suelo			Vegetación		
SO NE Perfil Coodenadas UTM (m) 730192/8500983 Elevación (m s.n.m.) 4141 Uso de suelo Patoreo Pendiente (%) 15 Exposición NE				Sellado superficial Agregados inestables (27 s) Hidrofobicidad Ligeramente hidrofóbico (12 s) Compactación del suelo Muy baja Flujo lateral No Macroporosidad Corte horizontal (25 x 25 cm) Profundidad (25 cm) Porosidad (%)81.6 Macroporos (Mp/m2)128 Profundidad (50 cm) Porosidad (%)76.3 Macroporos (Mp/m2)96			Cobertura vegetal 64% Formación vegetal Herbazal Tipo de vegetación Pajonal de puna húmeda Especies dominantes <i>Stipa</i> sp		
Propiedades del suelo									
Prof(cm)	Color	Textura del suelo			Densidad aparente (g/cm3)	Permeabilidad	ph	Contenido de (%)	
		Limo (%)	Arcilla (%)	Tipo				Materia orgánica	Humedad
25	10YR 3/1 Gris muy oscuro	34	23.4	Ls3	0.63	Medio	4.5	32	19.8
50	10YR 4/2	32.4	20.8	Ls3	0.74	Medio	4.5	16	44.1
75	Marrón grisáceo								
100	oscuro								
Velocidad de infiltración Hi (%)16.8 Hf(%)32.4 C0.15 Infiltración Hi (%)24 Hf(%)78.8 Ii (mm/h)11.3 Ib (mm/h)6.6 Tiempo Ib (min)26.9					Proceso de evaluación Intensidad de precipitación 30 mm/h THOF-HOF2				

Fuente: elaboración propia en base a datos tomados en campo.

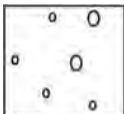
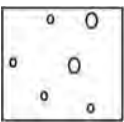
PERFIL DE SUELO: P 3														
Descripción del lugar				Superficie del suelo			Vegetación							
NOSE  Coodenadas UTM (m) 730321/8501140 Elevación (m s.n.m.) 4163 Uso de suelo Pastizal natural Pendiente (%) 19 Exposición NE				Sellado superficial Agregados estable (433 s) Hidrofobicidad Hidrofílica (1 s) Compactación del suelo Muy baja Flujo lateral Sí			Cobertura vegetal 85% Formación vegetal Herbazal Tipo de vegetación Pajonal de puna húmeda Especies dominantes <i>Calamagrostis affeminens</i>							
				Macroporosidad Corte horizontal (25 x 25 cm) Profundidad (25 cm) Porosidad (%)81 Macroporos (Mp/m2)128 Profundidad (50 cm) Porosidad (%)81.7 Macroporos (Mp/m2)128 										
Propiedades del suelo														
Prof (cm)	Color	Textura del suelo			Densidad aparente (g/cm3)	Permeabilidad	ph	Contenido de (%)						
		Limo (%)	Arcilla (%)	Tipo				Materia orgánica	Humedad					
25	10YR 3/3 Marrón oscuro	25.9	30.2	Lts	0.48	Bajo	6.6	40	16.1					
50	10YR 5/4	42.5	12.6	Slu	0.78	Alto	6.5	10	35.5					
75	Marrón													
100	amarillento													
Velocidad de infiltración 					Escoorrentía Hi (%)16.7 Hf(%)50.4 C0.27 Infiltración Hi (%)14.8 Hf(%)78.7 Ii (mm/h)11.8 Ib (mm/h)7.8 Tiempo Ib (min)24.7					Proceso de evaluación Intensidad de precipitación 30 mm/h SSF2				

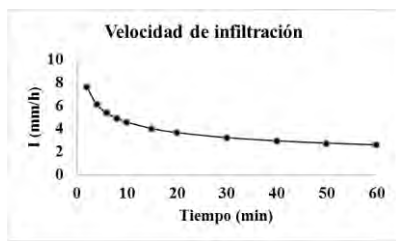
Fuente: elaboración propia en base a datos tomados en campo.

PERFIL DE SUELO: P 4									
Descripción del lugar				Superficie del suelo			Vegetación		
SENO  Coodenadas UTM (m) 730908/8500581 Elevación (m s.n.m.) 4023 Uso de suelo Matorral natural Pendiente (%) 13 Exposición NE				Sellado superficial Agregados estables (92 s) Hidrofobicidad Ligeramente Hidrofóbica (15 s) Compactación del suelo Muy baja Flujo lateral Sí Macroporosidad Corte horizontal (25 x 25 cm) Profundidad (25 cm) Porosidad (%) 66.6 Macroporos (Mp/m2) 80 Profundidad (50 cm) Porosidad (%) 78.8 Macroporos (Mp/m2) 96  			Cobertura vegetal 76% Formación vegetal Matorral Tipo de vegetación Matorral abutivo de Baccharis Especies dominantes Baccharis sp, Acaena ovalifolia, Senecio peruensis, Cerastium af mollisimun		
Propiedades del suelo									
Prof(cm)	Color	Textura del suelo			Densidad aparente (g/cm3)	Permeabilidad	ph	Contenido de (%)	
		Limo (%)	Arcilla (%)	Tipo				Materia orgánica	Humedad
25	10YR 4/3 Marrón	36.1	31.3	Lt2	0.56	Bajo	5.2	20	21.4
50	10YR 4/3 Marrón	45.8	19.1	Ls2	0.69	Medio	4.8	24	24.4
75									
100									

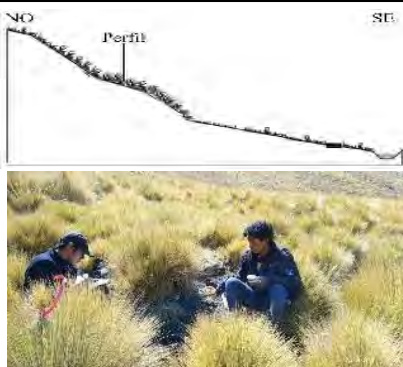
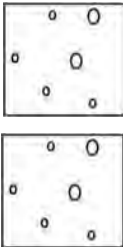
Velocidad de infiltración 	Escoorrentía Hi (%) 10.9 Hf(%) 15.8 C 0.01 Infiltración Hi (%) 14.3 Hf(%) 41.7 Ii (mm/h) 54.5 Ib (mm/h) 32.5 Tiempo Ib (min) 69.4	Proceso de evaluación Intensidad de precipitación 30 mm/h THOF-SSF2
---	--	---

Fuente: elaboración propia en base a datos tomados en campo.

PERFIL DE SUELO: P 5									
Descripción del lugar   Coodenadas UTM (m) 730990/8500457 Elevación (m s.n.m.) 4006 Uso de suelo Matorral natural Pendiente (%) 42 Exposición NE					Superficie del suelo Sellado superficial Agregados estables (849 s) Hidrofobicidad Hidrofílica (2 s) Compactación del suelo Muy baja			Vegetación Cobertura vegetal 85% Formación vegetal Matorral Tipo de vegetación Matorral arbustivo de Baccharis Especies dominantes <i>Baccharis sp, Stipa sp, Cerastium afmollisimun, Marchantia sp</i>	
					Flujo lateral Sí		Macroporosidad Corte horizontal (25 x 25 cm) Profundidad (25 cm) Porosidad (%)76.8 Macroporos (Mp/m2)128 Profundidad (50 cm) Porosidad (%)74.4 Macroporos (Mp/m2)96  		
Propiedades del suelo									
Prof (cm)	Color	Textura del suelo			Densidad aparente (g/cm3)	Permeabilidad	ph	Contenido de (%)	
		Limo (%)	Arcilla (%)	Tipo				Materia orgánica	Humedad
25	10YR 5/4 Marrón amarillento	44	20.6	Ls2	0.68	Medio	4.5	24	58.6
50	10YR 5/4	30.3	27.8	Ls2	0.77	Bajo	5	10	27.4
75	Marrón								
100	amarillento								

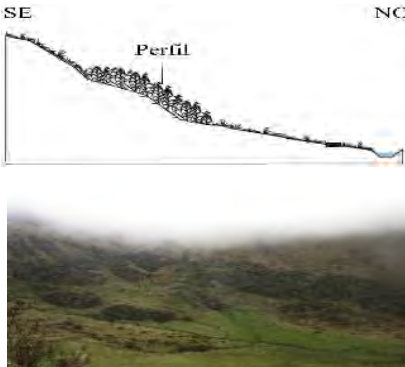
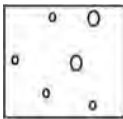
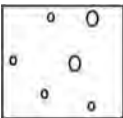
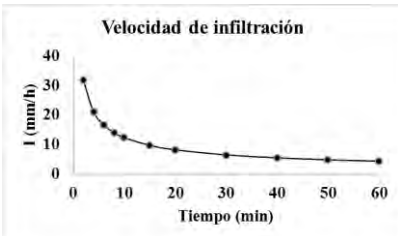
Velocidad de infiltración 			Escoorrentía Hi (%)42.3 Hf(%)60.3 C0.04 Infiltración Hi (%)16.8 Hf(%)52.1 Ii (mm/h)7.6 Ib (mm/h)5.6 Tiempo Ib (min)17.8			Proceso de evaluación Intensidad de precipitación 30 mm/h SSF2		
---	--	--	---	--	--	---	--	--

Fuente: elaboración propia en base a datos tomados en campo.

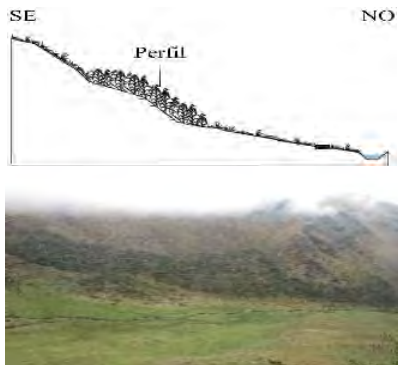
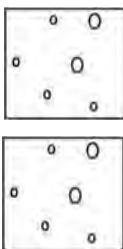
PERFIL DE SUELO: P 6									
Descripción del lugar  Coodenadas UTM (m) 731121/8500475 Elevación (m s.n.m.) 4027 Uso de suelo Pastizal natural Pendiente (%) 36 Exposición NE					Superficie del suelo Sellado superficial Agregados estables (223 s) Hidrofobicidad Hidrofílica (1 s) Compactación del suelo Muy baja			Vegetación Cobertura vegetal 80% Formación vegetal Herbazal Tipo de vegetación Pajonal de puna húmeda Especies dominantes <i>Stipa</i> sp	
					Macroporosidad Corte horizontal (25 x 25 cm) Profundidad (25 cm) Porosidad (%)83.3 Macroporos (Mp/m2)128 Profundidad (50 cm) Porosidad (%)87.5 Macroporos (Mp/m2)160 				
Propiedades del suelo									
Prof (cm)	Color	Textura del suelo			Densidad aparente (g/cm3)	Permeabilidad	ph	Contenido de (%)	
		Limo (%)	Arcilla (%)	Tipo				Materia orgánica	Humedad
25	10YR 3/1 Gris muy oscuro	32.3	28.5	Lt2	0.33	Bajo	4.5	44	80.3
50	10YR 5/4	28.5	34.2	Lts	0.79	Bajo	4.9	16.7	67
75	Marrón								
100	amarillento								

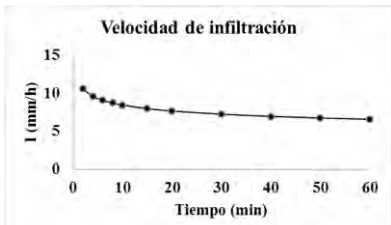
Escoorrentía Hi (%)45.1 Hf(%)64.1 C0.06 Infiltración Hi (%)77 Hf(%)100 Ii (mm/h)4.4 Ib (mm/h)3.1 Tiempo Ib (min)15.8				Proceso de evaluación Intensidad de precipitación 30 mm/h SSF2	
--	--	--	--	---	--

Fuente: elaboración propia en base a datos tomados en campo.

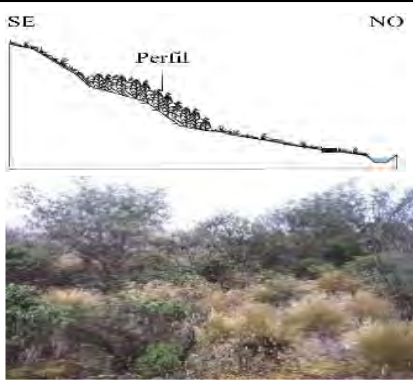
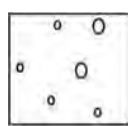
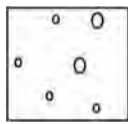
PERFIL DE SUELO: P 7									
Descripción del lugar SE NO  Coodenadas UTM (m) 731077/8500332 Elevación (m s.n.m.) 4198 Uso de suelo Matorral natural Pendiente (%) 42 Exposición NE					Superficie del suelo Sellado superficial Agregados estables (305 s) Hidrofobicidad Ligeramente hidrofóbica (17 s) Compactación del suelo Muy baja <td colspan="2"> Vegetación Cobertura vegetal 92% Formación vegetal Matorral Tipo de vegetación Matorral arbustivo de Baccharis Especies dominantes <i>Gynoxys sp.</i>, <i>Lachemilla diplofila</i>, <i>Stipa sp.</i>, <i>Acaena ovalifolia</i>, <i>Carex pichinchensis</i> </td>			Vegetación Cobertura vegetal 92% Formación vegetal Matorral Tipo de vegetación Matorral arbustivo de Baccharis Especies dominantes <i>Gynoxys sp.</i>, <i>Lachemilla diplofila</i>, <i>Stipa sp.</i>, <i>Acaena ovalifolia</i>, <i>Carex pichinchensis</i>	
					Flujo lateral Sí		Macroporosidad Corte horizontal (25 x 25 cm) Profundidad (25 cm) Porosidad (%)69.4 Macroporos (Mp/m2)80 Profundidad (50 cm) Porosidad (%)83.5 Macroporos (Mp/m2)176  		
Propiedades del suelo									
Prof (cm)	Color	Textura del suelo			Densidad aparente (g/cm3)	Permeabilidad	ph	Contenido de (%)	
		Limo (%)	Arcilla (%)	Tipo				Materia orgánica	Humedad
25	10YR 3/3 Marrón oscuro	30.7	31.6	Lt2	0.44	Bajo	4.8	30	27.1
50	10YR 4/2	32.2	32.5	Lt2	0.43	Bajo	4.6	35	43.2
75	Marrón grisáceo								
100	oscuro								
Escoorrentía  Hi (%)19.9 Hf(%)30.8 C0.06 Infiltración Hi (%)19.3 Hf(%)51.4 Ii (mm/h)31.9 Ib (mm/h)10.3 Tiempo Ib (min)61.1 Proceso de evaluación Intensidad de precipitación 30 mm/h THOF-SSF2									

Fuente: elaboración propia en base a datos tomados en campo.

PERFIL DE SUELO: P 8									
Descripción del lugar SE NO Perfil  Coodenadas UTM (m) 731055/8500010 Elevación (m s.n.m.) 4165 Uso de suelo Matorral natural Pendiente (%) 36 Exposición NE				Superficie del suelo Sellado superficial Agregados inestables (35 s) Hidrofobicidad Ligeramente hidrofóbico (8 s) Compactación del suelo Muy baja Flujo lateral Si			Vegetación Cobertura vegetal 66% Formación vegetal Matorral Tipo de vegetación Matorral arbustivo de Baccharis Especies dominantes Baccharis sp, Achyrocline alata, Stipa sp, Marchantia polymorpha		
				Macroporosidad Corte horizontal (25 x 25 cm) Profundidad (25 cm) Porosidad (%) 96 Macroporos (Mp/m2) 55 Profundidad (50 cm) Porosidad (%) 71 Macroporos (Mp/m2) 96 					
Propiedades del suelo									
Prof(cm)	Color	Textura del suelo			Densidad aparente (g/cm3)	Permeabilidad	ph	Contenido de (%)	
		Limo (%)	Arcilla (%)	Tipo				Materia orgánica	Humedad
25	10YR 4/2 Marrón grisáceo oscuro	25.3	38.7	Lts	0.77	Bajo	4.9	15	15.1
50	10YR 3/1	28	32.9	Lts	0.71	Bajo	4.8	24	24.9
75	Gris muy oscuro								
100									

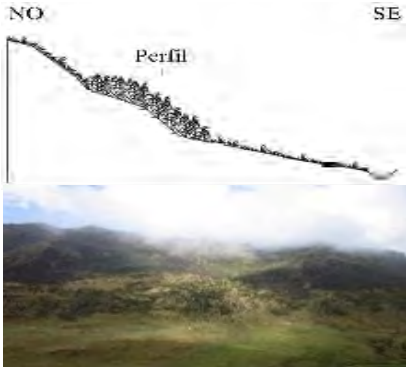
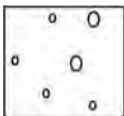
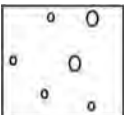
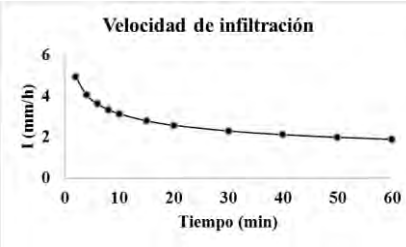
Velocidad de infiltración 	Escorrentía Hi (%) 12.4 Hf(%) 25.6 C 0.19 Infiltración Hi (%) 9.1 Hf(%) 46.3 Ii (mm/h) 10.6 Ib (mm/h) 9.5 Tiempo Ib (min) 13.4	Proceso de evaluación Intensidad de precipitación 30 mm/h SSF2
--	--	---

Fuente: elaboración propia en base a datos tomados en campo.

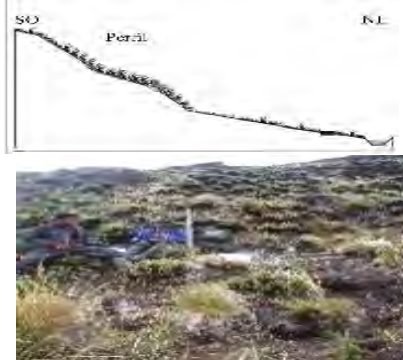
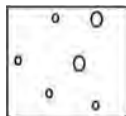
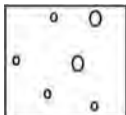
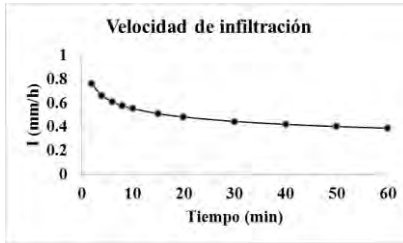
PERFIL DE SUELO: P 9									
Descripción del lugar SE NO Perfil  Coodenadas UTM (m) 731008/8499831 Elevación (m s.n.m.) 4147 Uso de suelo Matorral natural Pendiente (%) 36 Exposición NE					Superficie del suelo Sellado superficial Agregados inestables (30 s) Hidrofobicidad Ligeramente hidrofóbica (23 s) Compactación del suelo Muy baja			Vegetación Cobertura vegetal 60% Formación vegetal Matorral Tipo de vegetación Matorral arbustivo de Baccharis Especies dominantes Escallonia myrtilloides, Brachyotum naudinii, Jengia sp, Achyrocline alata, Lachemilla diplofila	
					Flujo lateral Sí		Macroporosidad Corte horizontal (25 x 25 cm) Profundidad (25 cm) Porosidad (%)69.8 Macroporos (Mp/m2)80 Profundidad (50 cm) Porosidad (%)76 Macroporos (Mp/m2)96  		
Propiedades del suelo									
Prof(cm)	Color	Textura del suelo			Densidad aparente (g/cm3)	Permeabilidad	ph	Contenido de (%)	
		Limo (%)	Arcilla (%)	Tipo				Materia orgánica	Humedad
25	10YR 4/3 Marrón	25.7	40.6	Lts	0.64	Bajo	4.7	20	14.6
50	10YR 4/3 Marrón	38.1	26.4	Lt2	0.62	Bajo	4.7	30	18.9
75									
100									

Escoorrentía Hi (%) 8.5 Hf(%) 11.1 C 0.38 Infiltración Hi (%) 13.9 Hf(%) 61.8 Ii (mm/h) 15.4 Ib (mm/h) 7.4 Tiempo Ib (min) 35.6					Proceso de evaluación Intensidad de precipitación 30 mm/h SSF2				
--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

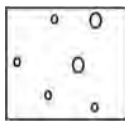
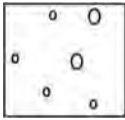
Fuente: elaboración propia en base a datos tomados en campo.

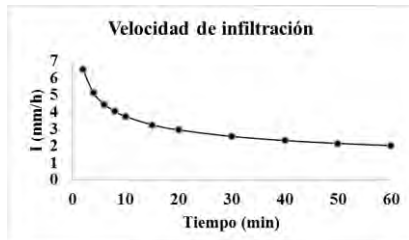
PERFIL DE SUELO: P 10									
Descripción del lugar				Superficie del suelo			Vegetación		
NOSE Perfil  Coodenadas UTM (m) 730780/8500102 Elevación (m s.n.m.) 4198 Uso de suelo Matorral natural Pendiente (%) 42 Exposición NE				Sellado superficial Agregados inestables (43 s) Hidrofobicidad Ligeramente hidrofóbico (26 s) Compactación del suelo Muy baja Flujo lateral Sí			Cobertura vegetal 60% Formación vegetal Matorral Tipo de vegetación Matorral arbustivo de Baccharis Especies dominantes Brachyotum naudinii, Stipa sp., Asplenium sp		
				Macroporosidad					
				Corte horizontal (25 x 25 cm)					
				Profundidad (25 cm)					
				Porosidad (%)		78.6			
				Macroporos (Mp/m2)		112			
				Profundidad (50 cm)					
				Porosidad (%)		78.2			
				Macroporos (Mp/m2)		96			
Propiedades del suelo									
Prof(cm)	Color	Textura del suelo			Densidad aparente (g/cm3)	Permeabilidad	ph	Contenido de (%)	
		Limo (%)	Arcilla (%)	Tipo				Materia orgánica	Humedad
25	10YR 4/3 Marrón	32.8	37.7	Lt3	0.58	Bajo	4.8	35	22.2
50	10YR 4/2 Marrón	36.8	34.7	Lt2	0.69	Bajo	4.6	32	15.6
75	Marrón grisáceo								
100	oscuro								
Velocidad de infiltración 					Escoorrentía				
					Hi (%)		9.1		
					Hf(%)		20.4		
					C		0.18		
					Infiltración				
					Hi (%)		14.3		
					Hf(%)		72.5		
					Ii (mm/h)		5		
					Ib (mm/h)		4.2		
					Tiempo Ib (min)		11.9		
Proceso de evaluación									
Intensidad de precipitación 30 mm/h									
THOF-SSF2									

Fuente: elaboración propia en base a datos tomados en campo.

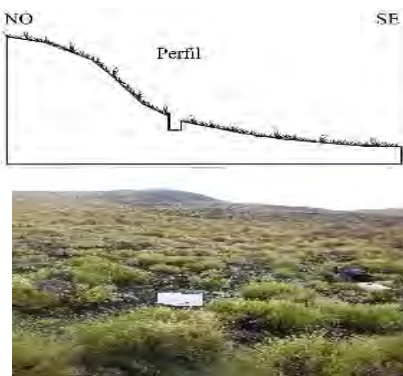
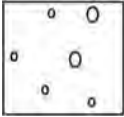
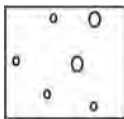
PERFIL DE SUELO: P 11									
Descripción del lugar  Coodenadas UTM (m) 730720/8500635 Elevación (m s.n.m.) 4060 Uso de suelo Patoreo Pendiente (%) 5 Exposición NE				Superficie del suelo Sellado superficial Agregados inestables (20 s) Hidrofobicidad Hidrofílica (1 s) Compactación del suelo Muy baja			Vegetación Cobertura vegetal 72% Formación vegetal Herbazal Tipo de vegetación Pajonal de puna húmeda Especies dominantes <i>Triquetella sp., Valeriana parvula, Halenia umbellata, Calamagrostis aff. eminens, Carex pichinchensis</i>		
				Flujo lateral No			Macroporosidad Corte horizontal (25 x 25 cm) Profundidad (25 cm) Porosidad (%)79.8 Macroporos (Mp/m2)112 Profundidad (50 cm) Porosidad (%)91.3 Macroporos (Mp/m2)144  		
Propiedades del suelo									
Prof(cm)	Color	Textura del suelo			Densidad aparente (g/cm3)	Permeabilidad	ph	Contenido de (%)	
		Limo (%)	Arcilla (%)	Tipo				Materia orgánica	Humedad
25	10YR 5/1 Gris	52.6	5.9	Us	0.23	Medio	7.9	40	82.8
50	10YR 5/1 Gris	39.5	23	Ls3	0.46	Medio	7.7	44	86.8
75									
100									
Velocidad de infiltración 				Escoorrentía Hi (%)94.8 Hf(%)96.8 C0.2 Infiltración Hi (%)82.2 Hf(%)86.8 Ii (mm/h)0.8 Ib (mm/h)1 Tiempo Ib (min)1.9			Proceso de evaluación Intensidad de precipitación 30 mm/h SOF2		

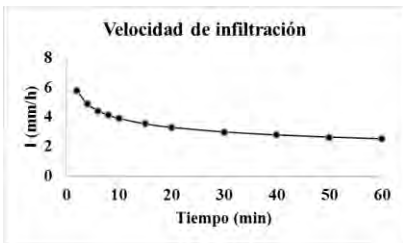
Fuente: elaboración propia en base a datos tomados en campo.

PERFIL DE SUELO: P 12									
Descripción del lugar  Coodenadas UTM (m) 730663/8500670 Elevación (m s.n.m.) 4069 Uso de suelo Pastizal natural Pendiente (%) 42 Exposición NE					Superficie del suelo Sellado superficial Agregados estables (154 s) Hidrofobicidad Hidrofílica (1 s) Compactación del suelo Muy baja			Vegetación Cobertura vegetal 60% Formación vegetal Herbazal Tipo de vegetación Pajonal de puna húmeda Especies dominantes <i>Stipa</i> sp	
					Flujo lateral Sí				
					Macroporosidad Corte horizontal (25 x 25 cm) Profundidad (25 cm) Porosidad (%)76.2 Macroporos (Mp/m2)96 Profundidad (50 cm) Porosidad (%)82.6 Macroporos (Mp/m2)128  				
Propiedades del suelo									
Prof (cm)	Color	Textura del suelo			Densidad aparente (g/cm3)	Permeabilidad	ph	Contenido de (%)	
		Limo (%)	Arcilla (%)	Tipo				Materia orgánica	Humedad
25	10YR 3/3 Marrón oscuro	32.7	29.7	Lt2	0.46	Bajo	4.6	32	14
50	10YR 4/2	25.4	22.2	Lt2	0.74	Bajo	4.6	32	14.4
75	Marrón grisáceo								
100	oscuro								

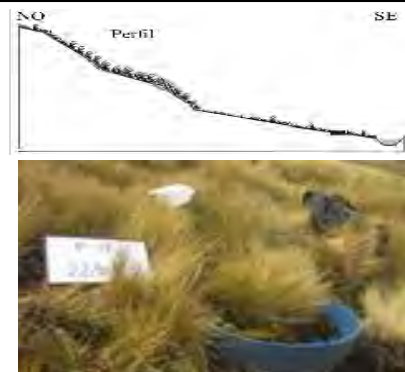
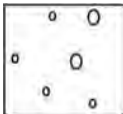
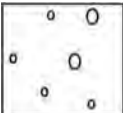
Escoorrentía  Velocidad de infiltración				Hi (%)8.5 Hf(%)24.4 C0.41		Proceso de evaluación Intensidad de precipitación 30 mm/h SSF2	
Infiltración Hi (%)14.6 Hf(%)72.4 Ii (mm/h)6.5 Ib (mm/h)4.8 Tiempo Ib (min)16.5							

Fuente: elaboración propia en base a datos tomados en campo.

PERFIL DE SUELO: P 13									
Descripción del lugar NO SE Perfil  Coodenadas UTM (m) 729610/8501105 Elevación (m s.n.m.) 4266 Uso de suelo Patoreo Pendiente (%) 13 Exposición NE					Superficie del suelo Sellado superficial Agregados estables (120 s) Hidrofobicidad Hidrofílica (1 s) Compactación del suelo Muy baja			Vegetación Cobertura vegetal 78% Formación vegetal Herbazal Tipo de vegetación Pajonal de puna húmeda Especies dominantes Calamagrostis affeminens, Alchemilla pinnata, Halenia bella	
					Flujo lateral Sí		Macroporosidad Corte horizontal (25 x 25 cm) Profundidad (25 cm) Porosidad (%)65.4 Macroporos (Mp/m2)80 Profundidad (50 cm) Porosidad (%)84 Macroporos (Mp/m2)128 		
Propiedades del suelo									
Prof(cm)	Color	Textura del suelo			Densidad aparente (g/cm3)	Permeabilidad	ph	Contenido de (%)	
		Limo (%)	Arcilla (%)	Tipo				Materia orgánica	Humedad
25	10YR 2/1 Negro	29.4	19.4	Ls4	0.42	Medio	6.5	24	18.3
50	10YR 3/1	36.3	17.1	Ls4	0.34	Medio	6.2	23.3	31.8
75	Gris muy oscuro								
100									

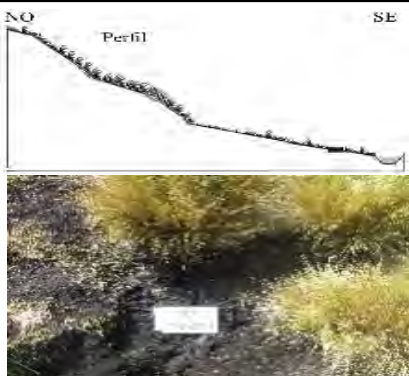
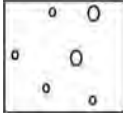
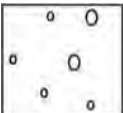
Velocidad de infiltración 				Escoorrentía Hi (%)17 Hf(%)42.3 C0.15 Infiltración Hi (%)20.5 Hf(%)57.8 Ii (mm/h)5.8 Ib (mm/h)4.9 Tiempo Ib (min)12.1			Proceso de evaluación Intensidad de precipitación 30 mm/h SSF2	
--	--	--	--	---	--	--	--	--

Fuente: elaboración propia en base a datos tomados en campo.

PERFIL DE SUELO: P 14									
Descripción del lugar  Coodenadas UTM (m) 729773/8501314 Elevación (m s.n.m.) 4284 Uso de suelo Pastizal natural Pendiente (%) 25 Exposición NE					Superficie del suelo Sellado superficial Agregados estables (576 s) Hidrofobicidad Hidrofílica (5 s) Compactación del suelo Muy baja			Vegetación Cobertura vegetal 78% Formación vegetal Herbazal Tipo de vegetación Pajonal de puna húmeda Especies dominantes <i>Werneria nubigena</i>, <i>Calamagrostis affeminens</i>, <i>Werneria vilosa</i>	
					Flujo lateral Sí		Macroporosidad Corte horizontal (25 x 25 cm) Profundidad (25 cm) Porosidad (%)78.5 Macroporos (Mp/m2)96 Profundidad (50 cm) Porosidad (%)79.7 Macroporos (Mp/m2)112  		
Propiedades del suelo									
Prof(cm)	Color	Textura del suelo			Densidad aparente (g/cm3)	Permeabilidad	ph	Contenido de (%)	
		Limo (%)	Arcilla (%)	Tipo				Materia orgánica	Humedad
25	10YR 4/3 Marrón	37.9	19	SI4	0.54	Alto	4.7	20	53
50	10YR 5/4 Marrón	28	29.4	Ls3	0.66	Medio	4.5	24	72.7
75	Marrón								
100	amarillento								

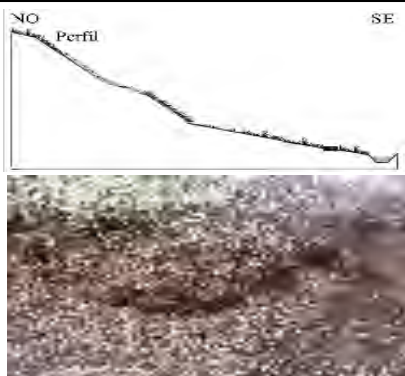
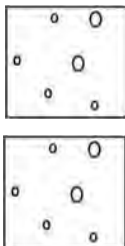
Escoorrentía Hi (%)29.9 Hf(%)56 C0.12 Infiltración Hi (%)25.7 Hf(%)95.3 Ii (mm/h)7.4 Ib (mm/h)6.5 Tiempo Ib (min)12.3			Proceso de evaluación Intensidad de precipitación 30 mm/h SSF2	
---	--	--	---	--

Fuente: elaboración propia en base a datos tomados en campo.

PERFIL DE SUELO: P 15									
Descripción del lugar  Coodenadas UTM (m) 729650/8501284 Elevación (m s.n.m.) 4299 Uso de suelo Pastizal natural Pendiente (%) 25 Exposición NE					Superficie del suelo Sellado superficial Agregados estables (61 s) Hidrofobicidad Hidrofílica (1 s) Compactación del suelo Muy baja			Vegetación Cobertura vegetal 78% Formación vegetal Herbazal Tipo de vegetación Pajonal de puna húmeda Especies dominantes <i>Calamagrostis affeminens</i>, <i>Alchemilla pinnata</i>	
					Flujo lateral Sí				
					Macroporosidad Corte horizontal (25 x 25 cm) Profundidad (25 cm) Porosidad (%)75.1 Macroporos (Mp/m2)96 Profundidad (50 cm) Porosidad (%)78.6 Macroporos (Mp/m2)112  				
Propiedades del suelo									
Prof(cm)	Color	Textura del suelo			Densidad aparente (g/cm3)	Permeabilidad	ph	Contenido de (%)	
		Limo (%)	Arcilla (%)	Tipo				Materia orgánica	Humedad
25	10YR 2/1 Negro	43.4	6.6	Lts	0.57	Bajo	6	40	42.4
50	10YR 5/3 Marrón	22.8	5.7	Su4	0.76	Alto	6.3	20	55
75									
100									

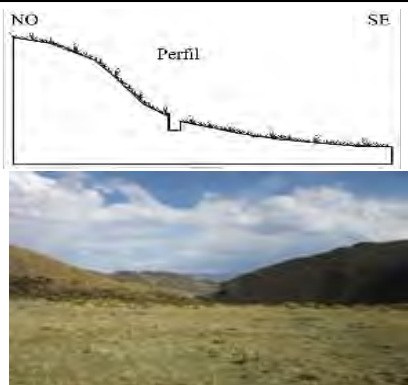
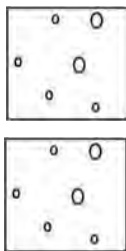
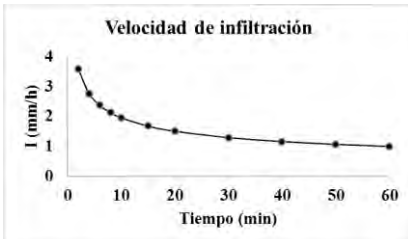
Escoorrentía Hi (%)25.1 Hf(%)44.7 C0.02 Infiltración Hi (%)14.9 Hf(%)77.3 Ii (mm/h)5.1 Ib (mm/h)4.5 Tiempo Ib (min)10.5					Proceso de evaluación Intensidad de precipitación 30 mm/h SSF2				
---	--	--	--	--	---	--	--	--	--

Fuente: elaboración propia en base a datos tomados en campo.

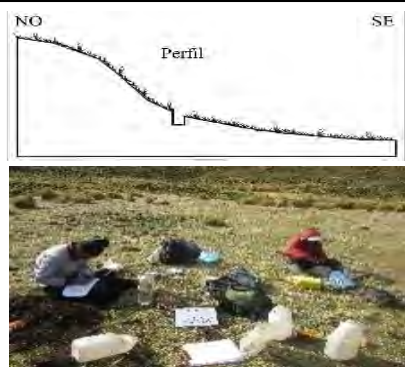
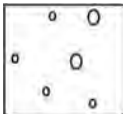
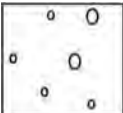
PERFIL DE SUELO: P 16									
Descripción del lugar  Coodenadas UTM (m) 729514/8501219 Elevación (m s.n.m.) 4344 Uso de suelo Pastizal xerofítico Pendiente (%) 36 Exposición NE					Superficie del suelo Sellado superficial Agregados inestables (1 s) Hidrofobicidad Hidrofílica (1 s) Compactación del suelo Muy baja			Vegetación Cobertura vegetal 54% Formación vegetal Herbazal Tipo de vegetación Pajonal de puna húmeda Especies dominantes <i>Oreithales integrifolia, Stipa sp</i>	
					Flujo lateral No				
					Macroporosidad Corte horizontal (25 x 25 cm) Profundidad (25 cm) Porosidad (%)44 Macroporos (Mp/m2)48 Profundidad (50 cm) Porosidad (%)64 Macroporos (Mp/m2)80 				
Propiedades del suelo									
Prof(cm)	Color	Textura del suelo			Densidad aparente (g/cm3)	Permeabilidad	ph	Contenido de (%)	
		Limo (%)	Arcilla (%)	Tipo				Materia orgánica	Humedad
25	10YR 4/3 Marrón	24.5	4.2	SI2	0.95	Muy alto	5	12	9.3
50	10YR 4/3 Marrón	31.3	25.8	Su2	0.99	Muy alto	6	8	10.5
75									
100									

Escoorrentía Hi (%)9 Hf(%)34.5 C0.28 Infiltración Hi (%)7.6 Hf(%)21.4 Ii (mm/h)82.6 Ib (mm/h)82.6 Tiempo Ib (min)163.1					Proceso de evaluación Intensidad de precipitación 30 mm/h DP				
--	--	--	--	--	---	--	--	--	--

Fuente: elaboración propia en base a datos tomados en campo.

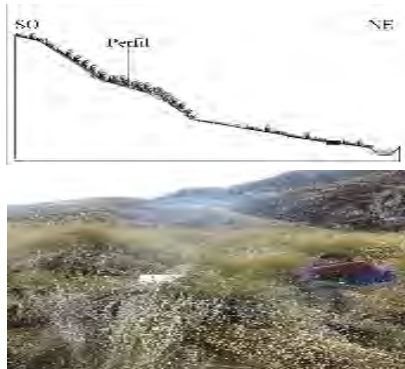
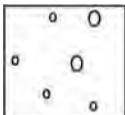
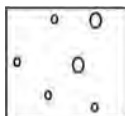
PERFIL DE SUELO: P 17											
Descripción del lugar  Coodenadas UTM (m) 729872/8500864 Elevación (m s.n.m.) 4365 Uso de suelo Patoreo Pendiente (%) 15 Exposición NE					Superficie del suelo Sellado superficial Agregados estables (240 s) Hidrofobicidad Ligeramente hidrofóbico (36 s) Compactación del suelo Muy baja			Vegetación Cobertura vegetal 78% Formación vegetal Herbazal Tipo de vegetación Pajonal de puna húmeda Especies dominantes <i>Calamagrostis affeminens</i>			
					Flujo lateral No						
					Macroporosidad Corte horizontal (25 x 25 cm) Profundidad (25 cm) Porosidad (%)75 Macroporos (Mp/m2)80 Profundidad (50 cm) Porosidad (%)78.2 Macroporos (Mp/m2)112 						
Propiedades del suelo											
Prof (cm)	Color	Textura del suelo			Densidad aparente (g/cm3)	Permeabilidad	ph	Contenido de (%)			
		Limo (%)	Arcilla (%)	Tipo				Materia orgánica	Humedad		
25	10YR 3/3 Marrón oscuro	31.2	23.3	Lt2	0.58	Bajo	4.8	36	13.7		
50	10YR 3/1										
75	Gris muy oscuro	27.6	29	Ls3	0.55	Medio	5	32	21.8		
100											
Velocidad de infiltración  Escoorrentía Hi (%)7.5 Hf(%)19.8 C0.34 Infiltración Hi (%)14.5 Hf(%)88.3 Ii (mm/h)3.6 Ib (mm/h)3 Tiempo Ib (min)11.3										Proceso de evaluación Intensidad de precipitación 30 mm/h THOF-HOF2	

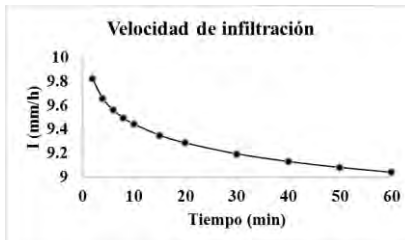
Fuente: elaboración propia en base a datos tomados en campo.

PERFIL DE SUELO: P 18									
Descripción del lugar  Coodenadas UTM (m) 730009/8501154 Elevación (m s.n.m.) 4332 Uso de suelo Patoreo Pendiente (%) 5 Exposición NE					Superficie del suelo Sellado superficial Agregados estables (146 s) Hidrofobicidad Ligeramente hidrofóbico (6 s) Compactación del suelo Muy baja			Vegetación Cobertura vegetal 84% Formación vegetal Herbazal Tipo de vegetación Pajonal de puna húmeda Especies dominantes <i>Calamagrostis aff eminens</i>, <i>Lachemilla diplofila</i>, <i>Hypochaeris taraxacoides</i>, <i>Lobelia remiformis</i>	
					Flujo lateral No		Macroporosidad Corte horizontal (25 x 25 cm) Profundidad (25 cm) Porosidad (%)85 Macroporos (Mp/m2)128 Profundidad (50 cm) Porosidad (%)85.3 Macroporos (Mp/m2)128  		
Propiedades del suelo									
Prof(cm)	Color	Textura del suelo			Densidad aparente (g/cm3)	Permeabilidad	ph	Contenido de (%)	
		Limo (%)	Arcilla (%)	Tipo				Materia orgánica	Humedad
25	10YR 2/1 Negro	34.7	13.8	Lts	0.39	Bajo	6.3	52	21.5
50	10YR 5/4	28.8	20	SI4	1.06	Alto	6.2	32	48.7
75	Marrón								
100	amarillento								

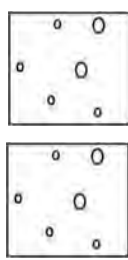
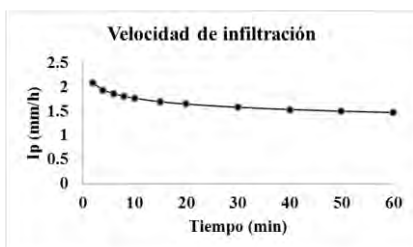
Escoorrentía Hi (%)17.5 Hf(%)36.3 C0.2 Infiltración Hi (%)17.2 Hf(%)79.1 Ii (mm/h)14 Ib (mm/h)7.5 Tiempo Ib (min)31.8			Proceso de evaluación Intensidad de precipitación 30 mm/h THOF-SOF2	
---	--	--	--	--

Fuente: elaboración propia en base a datos tomados en campo.

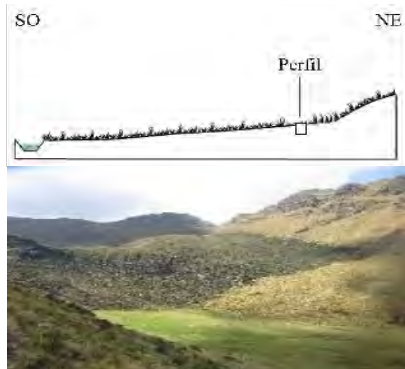
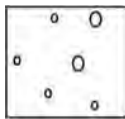
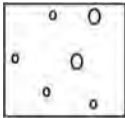
PERFIL DE SUELO: P 19									
Descripción del lugar				Superficie del suelo			Vegetación		
				Sellado superficial Agregados estables (81 s) Hidrofobicidad Hidrofílica (4 s) Compactación del suelo Muy baja			Cobertura vegetal 86% Formación vegetal Herbazal Tipo de vegetación Pajonal de puna húmeda Especies dominantes <i>Festuca sp</i>		
Coodenadas UTM (m) 730958/8500816 Elevación (m s.n.m.) 4077 Uso de suelo Pastizal natural Pendiente (%) 42 Exposición NE				Flujo lateral Sí					
				Macroporosidad Corte horizontal (25 x 25 cm) Profundidad (25 cm) Porosidad (%) 68.4 Macroporos (Mp/m2) 96 Profundidad (50 cm) Porosidad (%) 66.9 Macroporos (Mp/m2) 80 					
Propiedades del suelo									
Prof (cm)	Color	Textura del suelo			Densidad aparente (g/cm3)	Permeabilidad	ph	Contenido de (%)	
		Limo (%)	Arcilla (%)	Tipo				Materia orgánica	Humedad
25	10YR 4/1 Gris oscuro	27.9	20.6	Ls4	0.88	Medio	5.7	16	11.6
50	10YR 4/2	39.3	16.7	Ls4	0.92	Medio	5.7	15	14.4
75	Marrón grisáceo								
100	oscuro								

				Escoorrentía Hi (%) 9.4 Hf(%) 18.3 C 0.26 Infiltración Hi (%) 16.8 Hf(%) 26.6 Ii (mm/h) 9.8 Ib (mm/h) 10 Tiempo Ib (min) 2.5		Proceso de evaluación Intensidad de precipitación 30 mm/h SSF2	
--	--	--	--	---	--	---	--

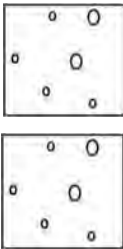
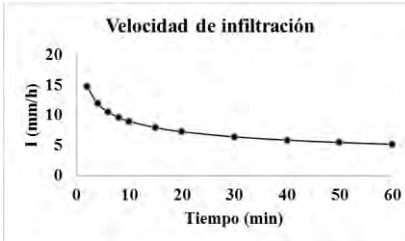
Fuente: elaboración propia en base a datos tomados en campo.

PERFIL DE SUELO: P 20									
Descripción del lugar				Superficie del suelo			Vegetación		
SO NE Perfil   Coodenadas UTM (m) 730817/8500799 Elevación (m s.n.m.) 4024 Uso de suelo Patoreo Pendiente (%) 5 Exposición NE				Sellado superficial Agregados inestables (57 s) Hidrofobicidad Hidrofílica (1 s) Compactación del suelo Muy baja			Cobertura vegetal 90% Formación vegetal Herbazal Tipo de vegetación Pajonal de puna húmeda Especies dominantes <i>Calamagrostis affeminens</i>		
				Flujo lateral No					
				Macroporosidad Corte horizontal (25 x 25 cm) Profundidad (25 cm) Porosidad (%)96.2 Macroporos (Mp/m2)160 Profundidad (50 cm) Porosidad (%)92.5 Macroporos (Mp/m2)144 					
Propiedades del suelo									
Prof (cm)	Color	Textura del suelo			Densidad aparente (g/cm3)	Permeabilidad	ph	Contenido de (%)	
		Limo (%)	Arcilla (%)	Tipo				Materia orgánica	Humedad
25	10YR 3/1 Gris muy oscuro	29.5	17	SI4	0.2	Alto	5.8	60	71
50	10YR 5/1 Gris	32.6	22.2	SI4	0.24	Alto	5.1	73.3	81.8
75									
100									
Velocidad de infiltración  Escoorrentía Hi (%)55.1 Hf(%)69.8 C0.02 Infiltración Hi (%)55.1 Hf(%)69.8 Ii (mm/h)2.1 Ib (mm/h)2.3 Tiempo Ib (min)2.3 Proceso de evaluación Intensidad de precipitación 30 mm/h SOF2									

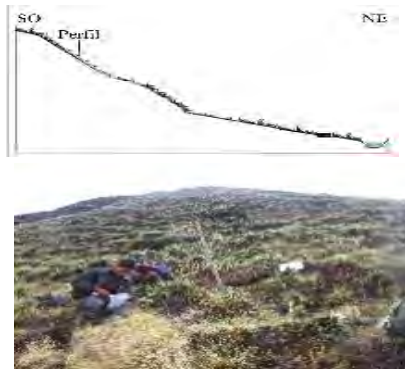
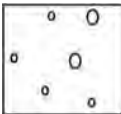
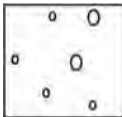
Fuente: elaboración propia en base a datos tomados en campo.

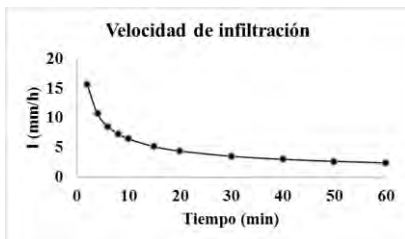
PERFIL DE SUELO: P 21									
Descripción del lugar SO NE Perfil  Coodenadas UTM (m) 730342/8500955730780/8500935 Elevación (m s.n.m.) 4044 Uso de suelo Patoreo Pendiente (%) 5 Exposición NE					Superficie del suelo Sellado superficial Agregados inestables (56 s) Hidrofobicidad Hidrofílica (1 s) Compactación del suelo Muy baja			Vegetación Cobertura vegetal 82% Formación vegetal Herbazal Tipo de vegetación Pajonal de puna húmeda Especies dominantes <i>Calamagrostis affeminens</i>, <i>Acaena ovalifolia</i>, <i>Halenia bella</i>, <i>Polytrichum pycnocarpum</i>	
					Flujo lateral No		Macroporosidad Corte horizontal (25 x 25 cm) Profundidad (25 cm) Porosidad (%)70.5 Macroporos (Mp/m2)96 Profundidad (50 cm) Porosidad (%)80.1 Macroporos (Mp/m2)128  		
Propiedades del suelo									
Prof(cm)	Color	Textura del suelo			Densidad aparente (g/cm3)	Permeabilidad	ph	Contenido de (%)	
		Limo (%)	Arcilla (%)	Tipo				Materia orgánica	Humedad
25	10YR 4/3 Marrón	38.9	12	Ls3	0.53	Medio	5.5	45.2	82.2
50	10YR 4/3 Marrón	35.4	15.6	SI3	0.48	Alto	4.5	32	76
75									
100									
Escoorrentía Hi (%)39.9 Hf(%)64.7 C0.22 Infiltración Hi (%)51.1 Hf(%)83.1 Ii (mm/h)4.5 Ib (mm/h)3.3 Tiempo Ib (min)14.9					Proceso de evaluación Intensidad de precipitación 30 mm/h SOF2				

Fuente: elaboración propia en base a datos tomados en campo.

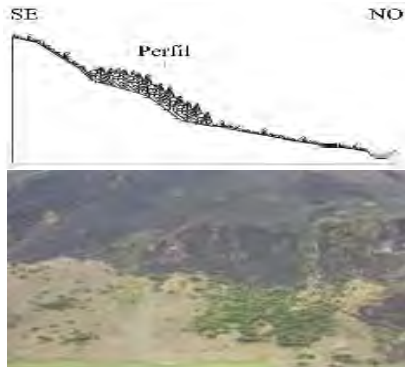
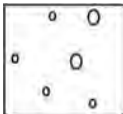
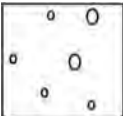
PERFIL DE SUELO: P 22									
Descripción del lugar  Coodenadas UTM (m) 730613/8500792 Elevación (m s.n.m.) 4084 Uso de suelo Pastizal natural Pendiente (%) 25 Exposición NE					Superficie del suelo Sellado superficial Agregados inestables (42 s) Hidrofobicidad Hidrofílica (1 s) Compactación del suelo Muy baja			Vegetación Cobertura vegetal 72% Formación vegetal Herbazal Tipo de vegetación Pajonal de puna húmeda Especies dominantes <i>Calamagrostis aff eminens</i>, <i>Laestadia aff muncicola</i>, <i>Achyrocline tomentosa</i>, <i>Carex pichinchensis</i>, <i>Acaulimalva nubigena</i>, <i>Halenia umbellata</i>	
					Flujo lateral Sí		Macroporosidad Corte horizontal (25 x 25 cm) Profundidad (25 cm) Porosidad (%)77.1 Macroporos (Mp/m2)96 Profundidad (50 cm) Porosidad (%)86.1 Macroporos (Mp/m2)144 		
Propiedades del suelo									
Prof (cm)	Color	Textura del suelo			Densidad aparente (g/cm3)	Permeabilidad	ph	Contenido de (%)	
		Limo (%)	Arcilla (%)	Tipo				Materia orgánica	Humedad
25	10YR 4/1 Gris oscuro	34.4	14.6	SI4	0.37	Alto	6	7.6	15.5
50	10YR 3/3	46.7	7.6	SI4	0.5	Alto	6.9	19.6	39.2
75	Marrón								
100	oscuro								
Velocidad de infiltración 					Escoorrentía Hi (%)37.5 Hf(%)85.5 C0.27 Infiltración Hi (%)13.2 Hf(%)54.2 Ii (mm/h)14.8 Ib (mm/h)9.4 Tiempo Ib (min)28.8		Proceso de evaluación Intensidad de precipitación 30 mm/h SSF2		

Fuente: elaboración propia en base a datos tomados en campo.

PERFIL DE SUELO: P 23									
Descripción del lugar  Coodenadas UTM (m) 730698/8500715 Elevación (m s.n.m.) 4081 Uso de suelo Pastizal natural Pendiente (%) 25 Exposición NE				Superficie del suelo Sellado superficial Agregados inestables (39 s) Hidrofobicidad Hidrofílica (1 s) Compactación del suelo Muy baja			Vegetación Cobertura vegetal 60% Formación vegetal Herbazal Tipo de vegetación Pajonal de puna húmeda Especies dominantes <i>Werneria nubigena, Vaccinium floribundum, Achyrocline ramosissima, Lachemilla vulcanica</i>		
				Flujo lateral Sí		Macroporosidad Corte horizontal (25 x 25 cm) Profundidad (25 cm) Porosidad (%)76.6 Macroporos (Mp/m2)96 Profundidad (50 cm) Porosidad (%)79.5 Macroporos (Mp/m2)112  			
Propiedades del suelo									
Prof (cm)	Color	Textura del suelo			Densidad aparente (g/cm3)	Permeabilidad	ph	Contenido de (%)	
		Limo (%)	Arcilla (%)	Tipo				Materia orgánica	Humedad
25	10YR 4/1 Gris oscuro	41.9	11.3	Su4	0.54	Alto	4.9	32	13.1
50	10YR 4/1 Gris oscuro	44	10.4	Siu	0.45	Alto	4.7	35	17.4
75									
100									

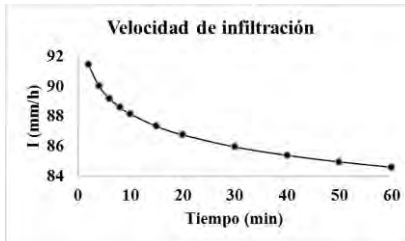
Velocidad de infiltración 				Escoorrentía Hi (%)13.3 Hf(%)23.7 C0.29 Infiltración Hi (%)18.3 Hf(%)52 Ii (mm/h)15.7 Ib (mm/h)6.9 Tiempo Ib (min)38		Proceso de evaluación Intensidad de precipitación 30 mm/h SSF2	
---	--	--	--	--	--	---	--

Fuente: elaboración propia en base a datos tomados en campo.

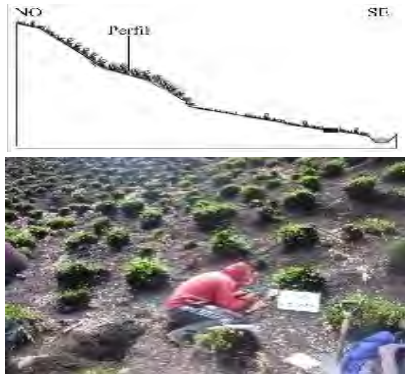
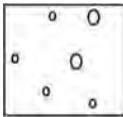
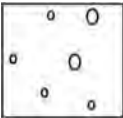
PERFIL DE SUELO: P 24									
Descripción del lugar SE NO Perfil  Coodenadas UTM (m) 730607/8500885 Elevación (m s.n.m.) 4064 Uso de suelo Matorral natural Pendiente (%) 36 Exposición NE					Superficie del suelo Sellado superficial Agregados estables (75 s) Hidrofobicidad Hidrofílica (1 s) Compactación del suelo Muy baja			Vegetación Cobertura vegetal 90% Formación vegetal Matorral Tipo de vegetación Matorral arbustivo de Baccharis Especies dominantes Ophryosporus sp, Baccharis sp, Acaena ovalifolia, Polytrichum pycnocarpum	
					Flujo lateral Sí		Macroporosidad Corte horizontal (25 x 25 cm) Profundidad (25 cm) Porosidad (%)69.2 Macroporos (Mp/m2)80 Profundidad (50 cm) Porosidad (%)79.7 Macroporos (Mp/m2)112  		
Propiedades del suelo									
Prof(cm)	Color	Textura del suelo			Densidad aparente (g/cm3)	Permeabilidad	ph	Contenido de (%)	
		Limo (%)	Arcilla (%)	Tipo				Materia orgánica	Humedad
25	10YR 3/3 Marrón oscuro	43.9	9.1	Siu	0.54	Alto	5.5	35.6	22.7
50	10YR 3/3	26.6	19.1	Ls4	0.45	Medio	4.9	32	21.9
75	Marrón								
100	oscuro								

Escoorrentía Hi (%)12.9 Hf(%)18.3 C0.06 Infiltración Hi (%)18.2 Hf(%)58.1 Ii (mm/h)91.5 Ib (mm/h)88.8 Tiempo Ib (min)20.3					Proceso de evaluación Intensidad de precipitación30 mm/h SSF2				
---	--	--	--	--	--	--	--	--	--

Velocidad de infiltración

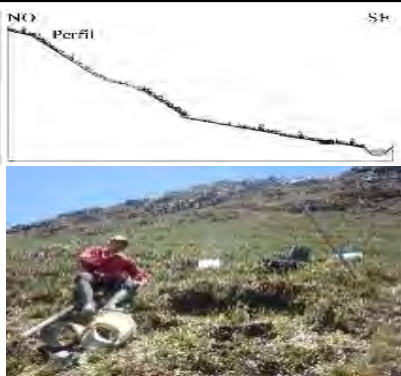
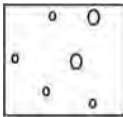
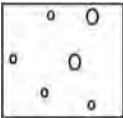


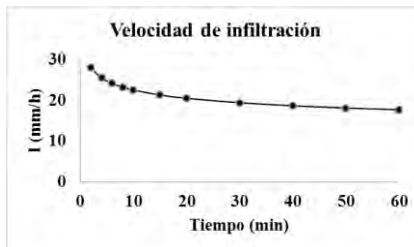
Fuente: elaboración propia en base a datos tomados en campo.

PERFIL DE SUELO: P 25									
Descripción del lugar  Coodenadas UTM (m) 730497/8500979 Elevación (m s.n.m.) 4099 Uso de suelo Pastizal natural Pendiente (%) 36 Exposición NE					Superficie del suelo Sellado superficial Agregados estables (165 s) Hidrofobicidad Hidrofílica (1 s) Compactación del suelo Muy baja			Vegetación Cobertura vegetal 90% Formación vegetal Herbazal Tipo de vegetación Pajonal de puna húmeda Especies dominantes <i>Cajophora pentlandii</i>, <i>Calamagrostis aff eminens</i>, <i>Valeriana micropterina</i>, <i>Arenaria sp</i>, <i>Halenia umbellata</i>	
					Flujo lateral Sí		Macroporosidad Corte horizontal (25 x 25 cm) Profundidad (25 cm) Porosidad (%)73.8 Macroporos (Mp/m2)96 Profundidad (50 cm) Porosidad (%)79.4 Macroporos (Mp/m2)112  		
Propiedades del suelo									
Prof(cm)	Color	Textura del suelo			Densidad aparente (g/cm3)	Permeabilidad	ph	Contenido de (%)	
		Limo (%)	Arcilla (%)	Tipo				Materia orgánica	Humedad
25	10YR 3/1 Gris muy oscuro	23.5	18.9	LS4	0.55	Medio	5.3	28.8	34
50	10YR 3/3	39.8	12.2	SI3	0.55	Alto	5.2	28	43.5
75	Marrón								
100	oscuro								

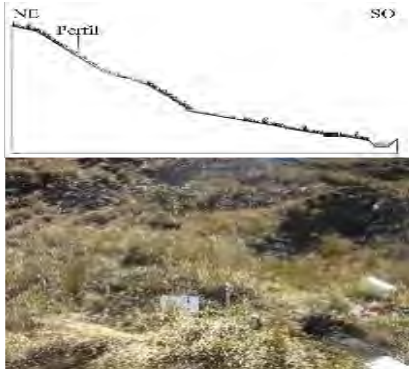
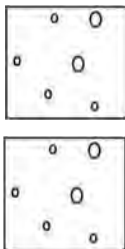
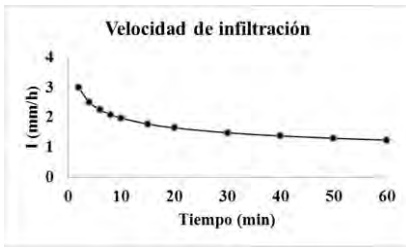
Escoorrentía Hi (%)50.9 Hf(%)80.7 C0.16 Infiltración Hi (%)27.2 Hf(%)66.8 Ii (mm/h)10.9 Ib (mm/h)8.3 Tiempo Ib (min)19.7				Proceso de evaluación Intensidad de precipitación 30 mm/h SSF2	
--	--	--	--	---	--

Fuente: elaboración propia en base a datos tomados en campo.

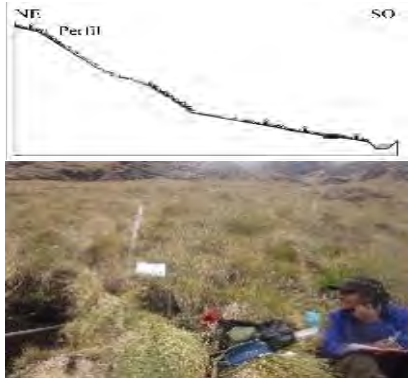
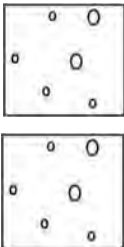
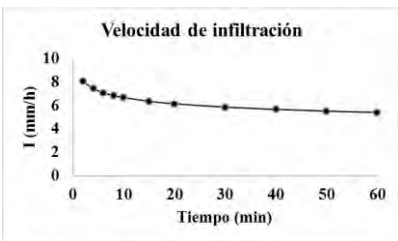
PERFIL DE SUELO: P 26									
Descripción del lugar  Coodenadas UTM (m) 730636/8501395 Elevación (m s.n.m.) 4277 Uso de suelo Pastizal natural Pendiente (%) 36 Exposición NE				Superficie del suelo Sellado superficial Agregados estables (761 s) Hidrofobicidad Hidrofílica (1 s) Compactación del suelo Muy baja			Vegetación Cobertura vegetal 58% Formación vegetal Herbazal Tipo de vegetación Pajonal de puna húmeda Especies dominantes Huperzia sp, Lysipomia laciniata, Stipa sp, Oritrophium hieracioides, Lycopodium sp, Werneria nubigena		
				Flujo lateral Sí			Macroporosidad Corte horizontal (25 x 25 cm) Profundidad (25 cm) Porosidad (%)79.9 Macroporos (Mp/m2)112 Profundidad (50 cm) Porosidad (%)90.8 Macroporos (Mp/m2)128  		
Propiedades del suelo									
Prof(cm)	Color	Textura del suelo			Densidad aparente (g/cm3)	Permeabilidad	ph	Contenido de (%)	
		Limo (%)	Arcilla (%)	Tipo				Materia orgánica	Humedad
25	10YR 4/1 Gris oscuro	33.1	7.4	Su3	0.39	Alto	5.3	22	78.5
50	10YR 5/2	29	12.9	SI3	0.57	Alto	5.3	24	90.8
75	Marrón								
100	grisáceo								

Escoorrentía Hi (%)52.3 Hf(%)58.5 C0.2		Proceso de evaluación Intensidad de precipitación 30 mm/h SSF2
Velocidad de infiltración 	Infiltración Hi (%)56.1 Hf(%)94.1 Ii (mm/h)28.1 Ib (mm/h)22.4 Tiempo Ib (min)30.7	

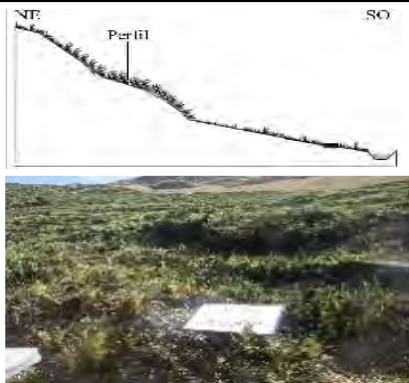
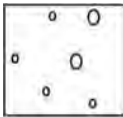
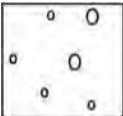
Fuente: elaboración propia en base a datos tomados en campo.

PERFIL DE SUELO: P 27									
Descripción del lugar  Coodenadas UTM (m) 730837/8501272 Elevación (m s.n.m.) 4255 Uso de suelo Pastizal natural Pendiente (%) 36 Exposición NE					Superficie del suelo Sellado superficial Agregados estables (120 s) Hidrofobicidad Hidrofílica (1 s) Compactación del suelo Muy baja			Vegetación Cobertura vegetal 56% Formación vegetal Herbazal Tipo de vegetación Pajonal de puna húmeda Especies dominantes <i>Stipa sp., Pernettya prostata, Luzula af racemosa, Valeriana micropterina, Castilleja fissifolia, Halenia umbellata</i>	
					Flujo lateral Sí		Macroporosidad Corte horizontal (25 x 25 cm) Profundidad (25 cm) Porosidad (%)51.3 Macroporos (Mp/m2)64 Profundidad (50 cm) Porosidad (%)67.3 Macroporos (Mp/m2)96 		
Propiedades del suelo									
Prof(cm)	Color	Textura del suelo			Densidad aparente (g/cm3)	Permeabilidad	ph	Contenido de (%)	
		Limo (%)	Arcilla (%)	Tipo				Materia orgánica	Humedad
25	10YR 4/3 Marrón	32.7	22.7	Ls3	0.87	Medio	4.6	16	21.8
50	10YR 4/3 Marrón	24.8	12.8	SI3	1.02	Alto	5.1	4	28.2
75									
100									
Velocidad de infiltración 					Escoorrentía Hi (%)22.8 Hf(%)34.6 C0.24 Infiltración Hi (%)18.2 Hf(%)59.6 Ii (mm/h)3 Ib (mm/h)2.9 Tiempo Ib (min)7.4			Proceso de evaluación Intensidad de precipitación 30 mm/h SSF2	

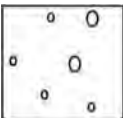
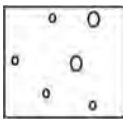
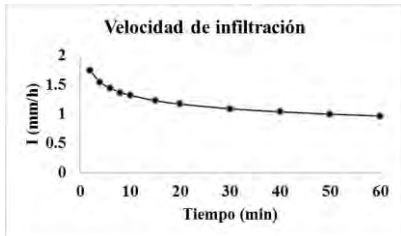
Fuente: elaboración propia en base a datos tomados en campo.

PERFIL DE SUELO: P 28									
Descripción del lugar				Superficie del suelo			Vegetación		
 Coodenadas UTM (m) 730892/8501074 Elevación (m s.n.m.) 4175 Uso de suelo Pastizal natural Pendiente (%) 36 Exposición NE				Sellado superficial Agregados inestables (36 s) Hidrofobicidad Fuertemente hidrofóbica (68 s) Compactación del suelo Muy baja			Cobertura vegetal 66% Formación vegetal Herbazal Tipo de vegetación Pajonal de puna húmeda Especies dominantes <i>Vaccinium floribundum</i>, <i>Valeriana micropterina</i>, <i>Galium canescens</i>, <i>Geranium difusun</i>, <i>Lachemilla orbiculata</i>, <i>Calamagrostis aff eminens</i>		
				Flujo lateral Sí					
				Macroporosidad Corte horizontal (25 x 25 cm) Profundidad (25 cm) Porosidad (%)41.9 Macroporos (Mp/m2)48 Profundidad (50 cm) Porosidad (%)68 Macroporos (Mp/m2)96 					
Propiedades del suelo									
Prof (cm)	Color	Textura del suelo			Densidad aparente (g/cm3)	Permeabilidad	ph	Contenido de (%)	
		Limo (%)	Arcilla (%)	Tipo				Materia orgánica	Humedad
25	10YR 4/2 Marrón grisáceo oscuro	37.9	26.4	Lt2	0.85	Bajo	5.5	32	35.5
50	10YR 4/2 Marrón grisáceo oscuro	29.8	36.4	Lts	0.93	Bajo	4.6	20	23.1
75									
100									
				Escoorrentía Hi (%)21.4 Hf(%)34.2 C0.4			Proceso de evaluación Intensidad de precipitación 30 mm/h SSF2		
 Velocidad de infiltración				Infiltración Hi (%)15.2 Hf(%)64.3 Ii (mm/h)8.1 Ib (mm/h)7.7 Tiempo Ib (min)9.2					

Fuente: elaboración propia en base a datos tomados en campo.

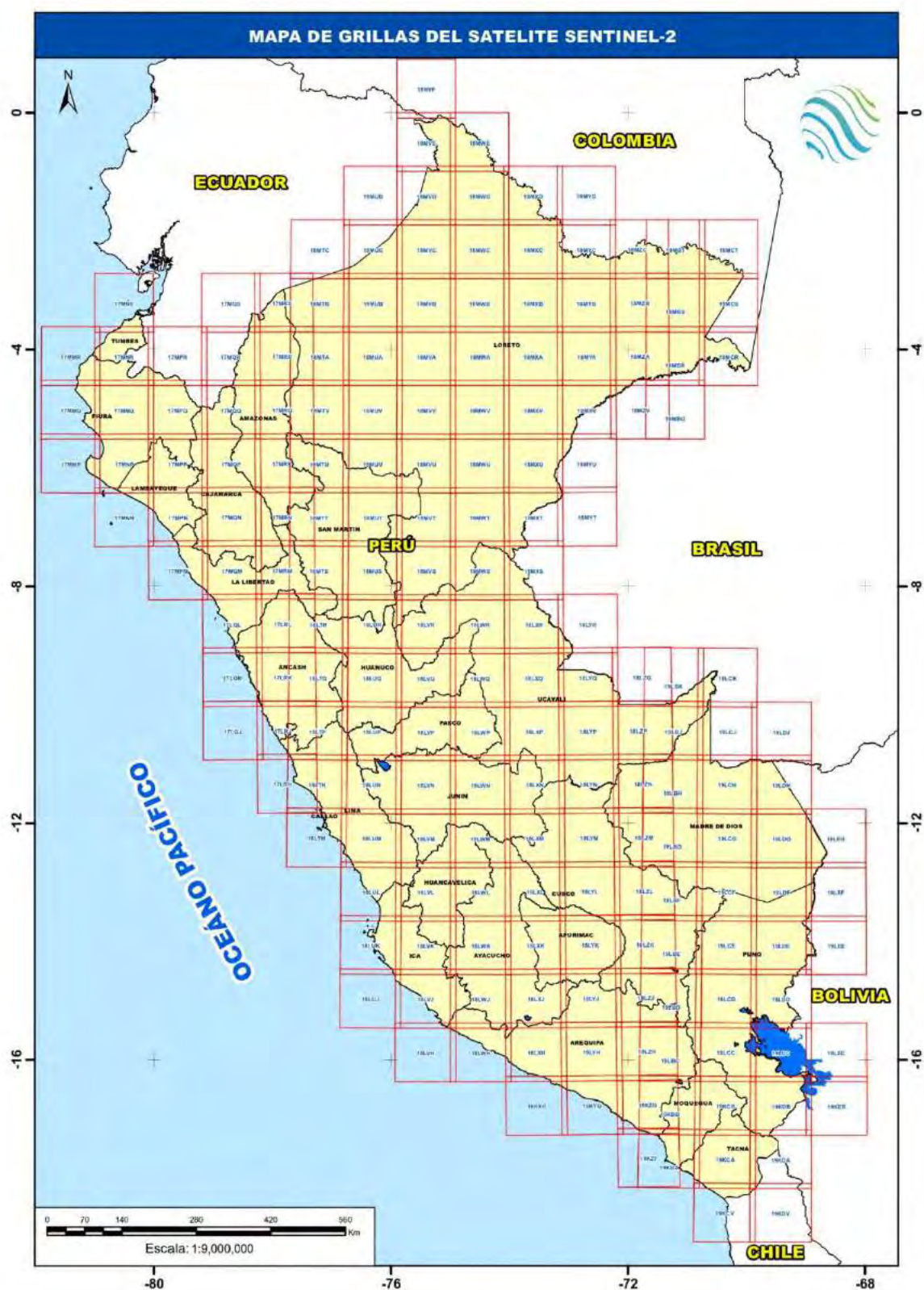
PERFIL DE SUELO: P 29									
Descripción del lugar  Coodenadas UTM (m) 730841/8501013 Elevación (m s.n.m.) 4108 Uso de suelo Pastizal natural Pendiente (%) 25 Exposición NE					Superficie del suelo Sellado superficial Agregados inestables (29 s) Hidrofobicidad Ligeramente hidrofóbico (12 s) Compactación del suelo Muy baja Flujo lateral Sí			Vegetación Cobertura vegetal 60% Formación vegetal Herbazal Tipo de vegetación Pajonal de puna húmeda Especies dominantes Ah sp, Stipa sp, Valeriana micropterina, Uncinia sp, Lycopodium sp, Luzula affracemosa	
					Macroporosidad Corte horizontal (25 x 25 cm) Profundidad (25 cm) Porosidad (%)79.6 Macroporos (Mp/m2)112 Profundidad (50 cm) Porosidad (%)69.1 Macroporos (Mp/m2)96  				
Propiedades del suelo									
Prof (cm)	Color	Textura del suelo			Densidad aparente (g/cm3)	Permeabilidad	ph	Contenido de (%)	
		Limo (%)	Arcilla (%)	Tipo				Materia orgánica	Humedad
25	10YR 4/2 Marrón grisáceo oscuro	43.4	8.8	Su4	0.82	Alto	4.2	24	19.3
50									
75	10YR 4/3 Marrón	39.7	20.6	Ls3	0.84	Medio	5.4	12.4	23.9
100									
Velocidad de infiltración 					Escoorrentía Hi (%)9 Hf(%)33.4 C0.26 Infiltración Hi (%)17.5 Hf(%)59.4 Ii (mm/h)4.6 Ib (mm/h)4.8 Tiempo Ib (min)2.1			Proceso de evaluación Intensidad de precipitación 30 mm/h THOF-SSF2	

Fuente: elaboración propia en base a datos tomados en campo.

PERFIL DE SUELO: P 30									
Descripción del lugar  Coodenadas UTM (m) 730745/8500694 Elevación (m s.n.m.) 4042 Uso de suelo Patoreo Pendiente (%) 5 Exposición NE				Superficie del suelo Sellado superficial Agregados inestables (54 s) Hidrofobicidad Hidrofílica (1 s) Compactación del suelo Muy baja Flujo lateral No			Vegetación Cobertura vegetal 88% Formación vegetal Herbazal Tipo de vegetación Pajonal de puna húmeda Especies dominantes Arenaria sp, Luzula afracemosa, Achyrocline tomentosa, Cerastium peruvianum, Ranunculus praemorsus, Alchemilla pinnata		
				Macroporosidad Corte horizontal (25 x 25 cm) Profundidad (25 cm) Porosidad (%)87.8 Macroporos (Mp/m2)128 Profundidad (50 cm) Porosidad (%)80 Macroporos (Mp/m2)89.3 					
Propiedades del suelo									
Prof(cm)	Color	Textura del suelo			Densidad aparente (g/cm3)	Permeabilidad	ph	Contenido de (%)	
		Limo (%)	Arcilla (%)	Tipo				Materia orgánica	Humedad
25	10YR 3/1 Gris muy oscuro	41.8	17.9	Slu	0.28	Alto	5.9	28	72.7
50	10YR 2/1 Negro	45.9	15	Slu	0.13	Alto	5.4	21.6	93.8
75									
100									
Velocidad de infiltración 				Escoorrentía Hi (%)63.2 Hf(%)74.6 C0.38 Infiltración Hi (%)59 Hf(%)90.9 Ii (mm/h)1.7 Ib (mm/h)1.9 Tiempo Ib (min)3.3			Proceso de evaluación Intensidad de precipitación 30 mm/h SOF2		

Fuente: elaboración propia en base a datos tomados en campo.

Anexo 12: Mapa de grilla del satélite Sentinel 2



Fuente: Bravo (2017: 31).

Anexo 13: Panel fotográfico



Proceso de Infiltración. a) Instalación del infiltrómetro de doble anillo. b) Diámetros del doble anillo D1=20 cm, D2=30 cm. c) Combinación de agua y anilina para identificar flujo lateral. d) Saturación del anillo externo e interno. e) Presencia de flujo lateral, profundidad 30 cm. f) Infiltrómetro mini disco, sensor de humedad y termómetro ambiental.



Proceso de Escorrentía. a) Simulador de escorrentía 1. b) Instalación simulador de escorrentía 2. c) Simulador de precipitación con temporizador incluido. d. Colector de escorrentía e) Simulación de precipitación con una intensidad de 30 mm/hora. f) Medición de escorrentía con probeta graduada de 1000 ml.



Toma y análisis de suelos. a) Extracción de suelos con barreno de 2 m. b) Calicata de 25x25x50 cm. c) Rotulado de muestras de suelos. d. Evaluación de Macroporosidad e) Evaluación de Hidrofobicidad. f) Evaluación de la Selladura de la superficie del suelo. g) Evaluación densidad aparente.



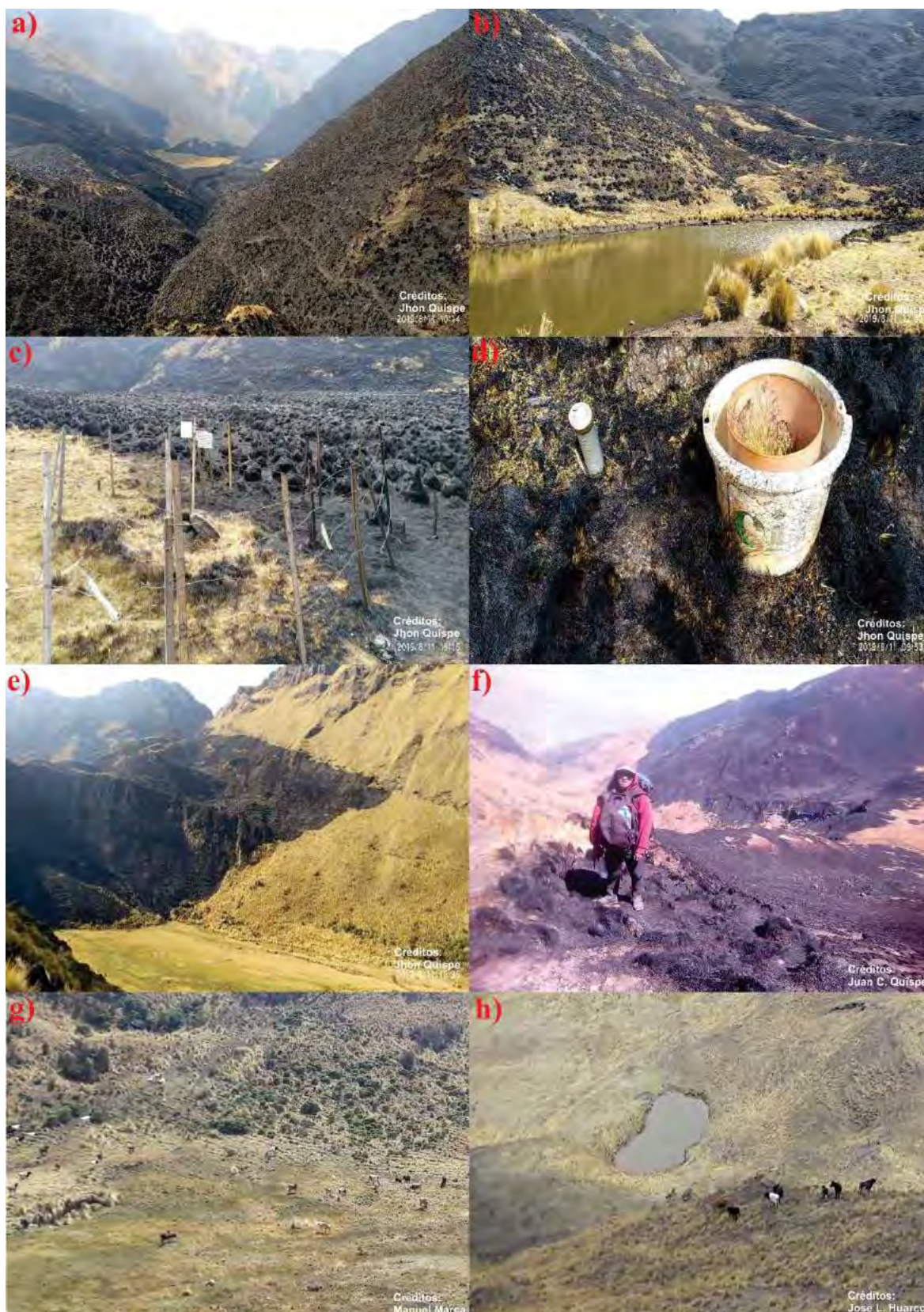
Colecta de vegetación. a) Parcelador para vegetación herbácea 1m². b) Colecta de vegetación herbácea. c) Parcela para vegetación arbustiva 25 m². d. Colecta de vegetación arbustiva.



Zona de estudio. a) Abra de acceso, después de ascender desde CCorimarca. b) Descenso a la zona de estudio. c) Bofedal Yuraqccasa (época de secas). d) Bofedal Yuraqccasa (época de lluvias). e) Catarara dentro de la quebrada Arapato. f) Pfacha de la comunidad de K'erapata. g) Laguna dentro de la quebrada Arapato.



Evaluación de suelos en gabinete. a) Estufa para secado de muestras. b) Muestras para humedad relativa, densidad aparente y textura de suelo. c) Tamizado de muestras de suelos. d) Textura de suelos. e) Horno mufla para materia orgánica. f) Muestras de suelos obtenidos por ignición. g) Ph del suelo. h) Estructura y Características hidromórficas del suelo



Impactos antrópicos dentro de la zona estudio. a) Incendio de la zona de estudio (10/08/2019). b) Afectación del incendio a cuerpos de agua. c) Afectación a instrumentación de monitoreo. d) Afectación a instrumentos de monitoreo y vegetación dominante. e) Afectación al bofedal Yuraqccasa. f) Vista del incendio desde el abra de acceso. g) Afectación de las laderas por pastoreo extensivo. h) Afectación de cuerpos de agua por sobrepastoreo.



Equipos de trabajo: M.Sc. Jan R. Baiker (co asesor), Bach. Jhon Gregory Quispe Almontes (tesista), José Luis Huarco, Liliana Gallegos, Rubén Darío Ttito, Manuel Marca, Cristhian Alvarez, Uriel Achahui, Lucero Alfaro Juan Carlos Quispe, Antony Cachi, Neisa Carrasco, Ruth Sonaira, Gaby Choque, Yaneth Mamani, Aydee Joachin, Sandra Quispe, Norma Mamani, Victor Ccoa, Lucely Vilca, Jesús Muñoz, Naisha Huamán, Marco Puertolas (estudiantes de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco), Sr. Juan Arredondo (Poblador de la comunidad de K'erpata).