

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

ESCUELA DE POSGRADO

**MAESTRÍA EN GESTIÓN INTEGRAL DE CUENCAS
HIDROGRÁFICAS**



**“ÁREAS POTENCIALES PARA REFORESTACIÓN EN LA
SUBCUENCA DEL RÍO SANTA EULALIA”**

Presentada por:

JUNIOR SUÁREZ FRANCO

**TESIS PARA OPTAR EL GRADO DE MAESTRO
MAGISTER SCIENTIAE EN GESTIÓN INTEGRAL DE
CUENCAS HIDROGRÁFICAS**

Lima - Perú

2024

Tesis VF

INFORME DE ORIGINALIDAD

9%

INDICE DE SIMILITUD

9%

FUENTES DE INTERNET

6%

PUBLICACIONES

0%

TRABAJOS DEL
ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

- 1** MINPETEL S.A.. "PMA del Proyecto Actualización en el Trazo de la Línea de Transmisión en 220 kV S.E. Cheves - S.E. Huacho - Reubicación de 4 Vértices- IGA0006541", Oficio N° 1109-2013-MEM/AEE, 2021
Publicación <1 %
- 2** observatoriochirilu.ana.gob.pe
Fuente de Internet <1 %
- 3** repositorio.continental.edu.pe
Fuente de Internet <1 %
- 4** ECOPLANEACION CIVIL S.A
ING.CONCONSULT.CONCONS. "EIA del Proyecto de Regulación de la Laguna Rajucolta (Tambillo)- IGA0005596", R.D. N° 388-2002-EM-DGAA, 2020
Publicación <1 %
- 5** upc.aws.openrepository.com
Fuente de Internet <1 %

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

**ESCUELA DE POSGRADO
MAESTRÍA EN GESTIÓN INTEGRAL DE CUENCAS
HIDROGRÁFICAS**

**“ÁREAS POTENCIALES PARA REFORESTACIÓN EN LA
SUBCUENCA DEL RÍO SANTA EULALIA”**

**TESIS PARA OPTAR EL GRADO DE MAESTRO
MAGISTER SCIENTIAE**

Presentada por:

JUNIOR SUÁREZ FRANCO

Sustentada y aprobada ante el siguiente jurado

Ph.D. Absalón Vásquez Villanueva
PRESIDENTE

Mg.Sc. Cayo Ramos Taype
ASESOR

Dr. Néstor Montalvo Arquíñigo
MIEMBRO

Dr. José Cuellar Bautista
MIEMBRO

DEDICATORIA

A mis padres Flavio y María.

AGRADECIMIENTOS

A mi asesor, Mg. Sc. Cayo Ramos Taype por su apoyo en la ejecución del trabajo de investigación.

Al Dr. Eloy Cuellar Bautista, Coordinador del Centro de Investigación en Silvicultura y Mejoramiento Forestal CESILMEF de la Facultad de Ciencias Forestales.

A Dr. Néstor Montalvo Arquíñigo por las orientaciones en el desarrollo de la presente investigación.

Al Ph.D. Absalón Vásquez por su disposición y aportes a la investigación.

Al Ingeniero Fernando Paz por su amabilidad y ayuda con sus recomendaciones y facilidades para el uso de sus equipos de medición.

Al Ingeniero Dennis Tarrillo por su ayuda en la absolución de dudas.

Al Ingeniero Jorge Cobián por las recomendaciones y apoyo desde su experiencia.

A los ingenieros Christian Rohner y Sergio Cardozo por su valiosa contribución.

A los ingenieros y amigos Erik Basualdo, Jorge Tejada, Arturo Navarro, Kris Ortiz por su apoyo en las salidas al campo.

A mi amigo y colega Mg. Sc. Rolando Montenegro Muro por su constante ayuda y recomendaciones.

A los estudiantes de pre grado de la Facultad de Ciencias Forestales Annie Caballero, Michelle Peramás, Gerson Hormaza por su apoyo en la toma de muestras.

A la Economista Milagros Espinoza por su constante apoyo hasta la presentación final de la tesis.

A la Ing. Rosa María Hermoza por sus aportes y recomendaciones.

Al Dr. Jorge Chávez por las facilidades brindadas para el uso de la camioneta de la FCF y estar presente el día de la sustentación.

A Jessica Malla, Jannette Torres, Rosa Zegarra, Maribel Orellano por las facilidades y el apoyo constante durante la ejecución del trabajo de investigación.

A la secretaria del Programa de Maestría Violeta Córdova por su apoyo en los trámites y gestiones.

ÍNDICE GENERAL

	Página
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. REVISIÓN DE LITERATURA.....	3
2.1. ANTECEDENTES	3
2.2. RECURSOS FORESTALES	4
2.2.1. Tierras para la forestación o reforestación	4
2.2.2. Plantaciones forestales	4
2.2.3. Aptitud forestal.....	4
2.2.4. Plantaciones de protección.....	5
2.3. SERVICIOS ECOSISTÉMICOS.....	5
2.3.1. Servicios ecosistémicos de la cobertura vegetal arbórea.....	5
2.3.2. Mecanismos de retribución por servicios ecosistémicos	7
2.4. INFRAESTRUCTURA VERDE.....	7
2.5. LOS BOSQUES Y EL AGUA	8
2.6. ESPECIES FORESTALES	12
2.6.1. Quinual (Polylepis incana).....	12
2.6.2. Colle (Buddleja coriácea).....	15
2.6.3. Lloque (Kageneckia lanceolata)	15
2.6.4. Chachacomo (Escallonia myrtilloides)	16
2.7. VARIABLES CONSIDERADAS EN LOS REQUERIMIENTOS AMBIENTALES DE LAS ESPECIES	16
2.7.1. Clima.....	16
2.7.2. Suelo.....	17
2.7.3. Topografía.....	19
2.8. COBERTURA DE LA TIERRA	21

2.8.1.	Metodología de clasificación de la cobertura de la tierra	21
III.	MATERIALES Y MÉTODOS.....	24
3.1.	ÁREA DE ESTUDIO	24
3.1.1	Ubicación geográfica	24
3.1.2	Precipitación en la subcuenca Santa Eulalia.....	25
3.1.3	Variación espacial de la precipitación respecto a la altitud.....	28
3.1.4	Oferta hídrica en la sub cuenca Santa Eulalia.....	29
3.1.5	Fuentes de agua superficial en la subcuenca Santa Eulalia.....	30
3.1.6	Temperatura	31
3.1.7	Cobertura vegetal	33
3.1.8	Suelos	38
3.2.	METODOLOGÍA	43
3.2.1.	Materiales	43
3.2.2.	Equipos	45
3.2.3.	Metodología.....	45
IV.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	55
4.1.	RESULTADOS.....	55
4.1.1.	Precipitación	55
4.1.2.	Temperatura	61
4.1.3.	pH.....	67
4.1.4.	Textura	76
4.1.5.	Altitud.....	81
4.1.6.	Pendientes.....	87
4.1.7.	Cobertura de la tierra	92
4.1.8.	Áreas potenciales	95
V.	CONCLUSIONES.....	108

VI. RECOMENDACIONES	110
VII.REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	111
VIII. ANEXOS	119

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Impacto del uso del suelo	12
Figura 2. Especies del género <i>Polylepis</i> reportadas para Perú	15
Figura 3. Clasificación de suelos en base a su CE y el efecto general sobre los cultivos ...	19
Figura 4. Mapa de ubicación del área de estudio	25
Figura 5. Distribución de la precipitación en la cuenca del río Rímac.....	27
Figura 6. Variación mensual de la precipitación – promedio multianual.....	28
Figura 7. Variación de la precipitación con respecto a la altitud	29
Figura 8. División de la subcuenca Santa Eulalia	30
Figura 9. Inventario de Fuentes de agua superficial en subcuenca Santa Eulalia	31
Figura 10. Temperaturas máximas en las cuencas del CHIRILU	32
Figura 11. Temperaturas mínimas en las cuencas del CHIRILU	33
Figura 12. Mapa de Cobertura Vegetal	34
Figura 13. Mapa de suelos.....	42
Figura 14. Requerimientos ambientales de las especies.....	46
Figura 15. Herramienta “Layer Stack” para unión de bandas espectrales.....	48
Figura 16. Herramienta “MosaicPro” para unión de escenas de imágenes.....	49
Figura 17. Equivalencias de la cobertura vegetal con la leyenda de <i>Corine Land Cover</i> ...	49
Figura 18. Valoración de acuerdo con los rangos	51
Figura 19. Valoración de la cobertura de la tierra	52
Figura 20. Procedimiento para la zonificación de áreas optimas	53
Figura 21. Precipitación media mensual para el periodo de 1990 – 2015.....	55
Figura 22. Interpolación utilizando IDW	56
Figura 23. Interpolación de la precipitación utilizando Kriging ordinario.....	57

Figura 48. Mapa de rango altitudinal de la subcuenca	82
Figura 49. Mapa de rango altitudinal para el Quinual	83
Figura 50. Mapa de rango altitudinal para el Colle	84
Figura 51. Mapa de rango altitudinal para el Lloque	85
Figura 52. Mapa de rango altitudinal para el Chachacomo	86
Figura 53. Mapa de rango de pendientes	87
Figura 54. Zonas aptas y no aptas en pendiente para el Quinual.....	88
Figura 55. Zonas aptas y no aptas en pendiente para el Colle	89
Figura 56. Zonas aptas y no aptas en pendiente para el Lloque	90
Figura 57. Zonas aptas y no aptas en pendiente para el Chachacomo.....	91
Figura 58. Mapa de cobertura de la tierra en la subcuenca Santa Eulalia	94
Figura 59. Áreas óptimas para reforestación con el Quinual	95
Figura 60. Áreas óptimas para reforestación con el Colle	96
Figura 61. Áreas óptimas para reforestación con el Lloque	97
Figura 62. Áreas óptimas para reforestación con el Chachacomo	98
Figura 63. Áreas potenciales para reforestación en la subcuenca del río Santa Eulalia	99
Figura 64. Zonas rocosas en áreas óptimas para el Quinual	100
Figura 65. Zonas rocosas en áreas óptimas para el Colle	100
Figura 66. Áreas potenciales para reforestación en la subcuenca del río Santa Eulalia ..	101
Figura 67. Áreas potenciales para reforestación en la subcuenca del río Santa Eulalia	102
Figura 68. Zonas óptimas en tierras desnudas para el Quinual y en herbazal para el Colle	103
Figura 69. Puntos de Validación de pH y cobertura	104
Figura 70. Correlación entre el pH medido y el interpolado	105
Figura 71. Mapa de áreas potenciales para reforestación con áreas corregidas (no aptas)	107

ÍNDICE DE TABLAS

	Página
Tabla 1. Rangos de clasificación de pendientes	20
Tabla 2. Leyenda <i>Corine Land Cover</i>	22
Tabla 3. Precipitación total mensual (mm) – promedio multimensual (1990-2010)	26
Tabla 4. Superficie cubierta por tipo de suelo en la subcuenca Santa Eulalia	43
Tabla 5. Uso de la tierra de la subcuenca Santa Eulalia	93
Tabla 6. Medición de la conductividad eléctrica en el suelo.....	105

ÍNDICE DE ANEXOS

	Página
Anexo 1. Puntos de muestreo de suelos	119
Anexo 2. Validación y mediciones del área óptima para Lloque (L1).....	120
Anexo 3. Validación y mediciones del área óptima para Lloque (L2).....	121
Anexo 4. Validación y mediciones del área óptima para Lloque (L3).....	122
Anexo 5. Validación y mediciones del área óptima para Lloque (L4).....	123
Anexo 6. Validación y mediciones del área óptima para Quinual (Q1).....	124
Anexo 7. Validación y mediciones del área óptima para Lloque, Chachacomo y Colle (L5CH1CO1)	125
Anexo 8. Validación y mediciones del área óptima para Lloque y Colle (L6CO3).....	126
Anexo 9. Validación y mediciones del área óptima para Quinual (Q2).....	127
Anexo 10. Validación y mediciones del área óptima para Lloque y Colle (L7CO4).....	128
Anexo 11. Validación y mediciones del área óptima para Chachacomo (CH2)	129
Anexo 12. Validación y mediciones del área óptima para Chachacomo (CH3)	130
Anexo 13. Validación y mediciones del área óptima para Lloque, Colle y Chachacomo (L8CO5CH4)	131
Anexo 14. Validación y mediciones del área óptima para Colle (CO6)	132
Anexo 15. Validación y mediciones del área óptima para Colle y Quinual (CO8Q3).....	133
Anexo 16. Área óptima para Colle sobre andenes (zona agrícola) (CO2)	134
Anexo 17. Área óptima para Colle sobre construcciones (CO10)	134
Anexo 18. Puntos de Validación	135
Anexo 19. Puntos de Validación para el Colle que no corresponde	136
Anexo 20. Resultados del laboratorio de análisis de suelo (primera parte)	137
Anexo 21. Resultados del laboratorio de análisis de suelo (segunda parte).....	138
Anexo 22. Colecta de muestra de suelo M17	139

Anexo 23. Colecta de muestra de suelo M18	139
Anexo 24. Colecta de muestra de suelo M19	140
Anexo 25. Colecta de muestra de suelo M20	140
Anexo 26. Colecta de muestra de suelo M21	141
Anexo 27. Colecta de muestra de suelo M22	141
Anexo 28. Colecta de muestra de suelo M23	142
Anexo 29. Lloque sobre áreas con pedregosidad superficial	143

RESUMEN

La presente investigación se desarrolló con el objetivo de modelar las áreas potenciales donde se recomendaría instalar especies forestales, dentro de la subcuenca del río Santa Eulalia, de acuerdo con sus requerimientos ambientales, ecológicos y fisiográficos como; precipitación, temperatura, pH, textura del suelo, altitud y pendiente del terreno. La primera parte de la investigación consistió en la recopilación de datos de estas 6 variables. Para el caso de precipitación y temperatura la información se obtuvo del programa PISCO del SENAMHI, para un periodo de 25 años (1990-2015). Para conocer el pH del suelo se realizaron salidas al campo para la recolección de muestras que fueron analizadas posteriormente en laboratorio, la textura del suelo se obtuvo de la plataforma mundial Soilgrids. Finalmente, la información correspondiente a altitud y pendiente se obtuvo de un Modelo de Elevación Digital (DEM) ALOS PALSAR. Adicionalmente se realizó una clasificación de la cobertura de la tierra utilizando el mapa de cobertura vegetal del MINAM y una imagen Sentinel, para descartar las áreas que actualmente poseen un uso. En la segunda parte se procesó toda esta información y con la ayuda del software Arcgis se obtuvieron mapas con zonas aptas y no aptas a través de una reclasificación de los valores de estas variables según los requerimientos de las especies. Para esto se establecieron rangos para cada variable, asignando el valor de 1 a los intervalos donde el requerimiento de la especie estaba dentro del rango y 0 a los intervalos donde los requerimientos no coincidían. Posteriormente se unieron todos los mapas de cada una de las variables utilizando la herramienta *Fuzzy Overlay* del Arcgis con lo cual se obtuvieron los mosaicos que representan las áreas donde coinciden en valor 1 todas las variables. Finalmente se realizó una salida a campo para la validación de los resultados, donde se corroboró lo generado espacialmente y adicionalmente se tomó muestras de suelo donde se midió el pH para validar la interpolación y también se midió la conductividad eléctrica al ser un factor importante en el desarrollo de los cultivos, para este caso forestales. Se realizaron las correcciones correspondientes y se generó el mapa final donde se obtuvo 16 869 hectáreas con potencial para la reforestación con Quinual, Lloque, Colle y Chachacomo, donde el Lloque es la especie que presenta mayor área óptima con 7802 has, seguido de Colle con 6935 has, Quinual con 2055 has y Chachacomo con 423 has.

Palabras claves: Cuencas, reforestación, modelamiento, regulación hídrica, aptitud forestal

ABSTRACT

The present research was developed with the objective of modeling the potential areas where it would be recommended to install forest species, within the sub-basin of the Santa Eulalia River, according to its environmental, ecological and physiographic requirements such as; precipitation, temperature, pH, soil texture, altitude and slope of the terrain. The first part of the research consisted of collecting data on these 6 variables. In the case of precipitation and temperature, the information was obtained from the PISCO program of SENAMHI, for a period of 25 years (1990-2015). To know the pH of the soil, field trips were made to collect samples that were subsequently analyzed in the laboratory. The soil texture was obtained from the global Soilgrids platform. Finally, the information corresponding to altitude and slope was obtained from an ALOS PALSAR Digital Elevation Model (DEM). Additionally, a land cover classification was carried out using the MINAM vegetation cover map and a Sentinel image, to discard the areas that currently have a use. In the second part, all this information was processed and with the help of the Arcgis software, maps with suitable and unsuitable areas were obtained through a reclassification of the values of these variables according to the requirements of the species. For this, ranges were established for each variable, assigning the value of 1 to the intervals where the species' requirement was within the range and 0 to the intervals where the requirements did not coincide. Subsequently, all the maps of each of the variables were joined using the Fuzzy Overlay tool of Arcgis, thereby obtaining the mosaics that represent the areas where all the variables coincide with a value of 1. Finally, a field trip was carried out to validate the results, where what was generated spatially was corroborated and additionally soil samples were taken where the pH was measured to validate the interpolation and the electrical conductivity was also measured as it is an important factor in the development of crops, in this case forestry. The corresponding corrections were made and the final map was generated where 16,869 hectares with potential for reforestation were obtained with Quinual, Lloque, Colle and Chachacomo, where Lloque is the species that has the largest optimal area with 7802 hectares, followed by Colle with 6935 hectares, Quinual with 2055 hectares and Chachacomo with 423 hectares.

Keywords: Watershed, reforestation, modeling, water regulation, forestry aptitude

I. INTRODUCCIÓN

Según Muñoz (2011) la expansión económica y demográfica que vive el Perú en los tiempos recientes demanda un incremento en la provisión de agua, debido a que este recurso tiende a ser cada vez más escaso con respecto a las zonas geográficas o territorios donde se expanden las actividades productivas y se incrementa la población. Además, debido a las condiciones naturales, la distribución de agua en Perú es desigual. El 97.7 por ciento del agua disponible fluye hacia la vertiente oriental de la Amazonía, donde vive el 26 por ciento de la población. Por otro lado, solo el 1,8 por ciento del agua fluye hacia la vertiente del Pacífico, donde reside el 70 por ciento de la población. Esta distribución desproporcionada dificulta satisfacer las necesidades de agua para el uso residencial, agrícola e industrial. Este incremento poblacional ha producido el aumento de los procesos de urbanización y los movimientos migratorios. Esta tendencia tendrá un gran impacto en las generaciones futuras, siendo uno de los más importantes el suministro de agua para los habitantes.

Según el INEI (2018), la población total estimada en el Perú al 2017 fue de 31 237 385 habitantes, indicando que la tasa de crecimiento había disminuido a nivel nacional, sin embargo, la distribución de la población no era la adecuada, pues el 58 por ciento, se encuentra asentada en la zona costera, especialmente en la capital, Lima, la cual concentra el 29,2 por ciento del total de la población nacional.

De acuerdo con la Autoridad Nacional del Agua ANA (s. f.), el incremento de la población sin una adecuada planificación, junto con la contaminación, la pobreza y el aumento de sectores que demandan el agua, aumentarán la presión sobre los recursos hídricos. Como resultado, el consumo de agua en la urbe se duplicará para el año 2025. Así mismo, menciona que habrá cambios en los patrones de precipitación como consecuencia del cambio climático, lo que afectará la disponibilidad de agua y generará un incremento en desastres vinculados con el agua.

Los ríos Chillón, Lurín y Rímac, son los encargados de suministrar el recurso hídrico a la ciudad de Lima, siendo el último el que lo hace en mayor proporción. Sin embargo, el río Rímac es considerado uno de los más contaminados del mundo. Las partes media y alta de la cuenca, donde se ubica la subcuenca de río Santa Eulalia, están contaminados por residuos mineros; y, la parte inferior, por residuos orgánicos y toxinas derivadas de los residuos industriales, domésticos y agrícolas y la mala disposición de residuos sólidos a lo largo de su longitud (Echevarría & Zucchetti 2008).

Ante este escenario se viene desarrollando proyectos de “Infraestructura Verde” que permitirán, en unos años, hacer frente a la escasez hídrica a través de actividades como la forestación, restauración de humedales, construcción de zanjas de infiltración, recuperación de andenes entre otras técnicas que van acorde al medio donde se ejecutara tomando en consideración su entorno físico, económico, social y cultural.

En ese sentido, el objetivo general de la investigación es modelar las áreas potenciales para la reforestación que contribuyan a regular el régimen hidrológico en la subcuenca del río Santa Eulalia y los objetivos específicos son los siguientes: (i) Diferenciar la parte baja, media y alta de la subcuenca del río Santa Eulalia en función de variables de altitud, temperatura y precipitación; (ii) Identificar la cobertura de la tierra existente en la subcuenca del río Santa Eulalia; (iii) Proponer alternativas de especies forestales que contribuyan a regular el régimen hidrológico en la subcuenca del río Santa Eulalia.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. ANTECEDENTES

AQUAFONDO (2017) desarrolló un estudio donde indica que las partes altas y medias de las cuencas de los ríos Chillón, Rímac y Lurín, presentan zonas aptas para el desarrollo de proyectos de infraestructura verde, dentro de los cuales incluye a la reforestación con especies nativas.

Para la identificación de las áreas potenciales utilizaron información secundaria como: mapa de zonas de vida, mapa ecológico del Perú, mapa de cobertura vegetal y el mapa hidrogeológico, cada una con su respectiva memoria descriptiva. además de entrevistas a representantes de comunidades campesinas, así como de gobiernos locales.

Los proyectos de infraestructura verde, dentro de los cuales se encuentra la reforestación, tienen la función de regulación hídrica y de sembrar agua, vale decir, regular y recargar el acuífero de forma natural.

Rau (2012) realizó una investigación en la provincia de Tarma ubicado entre los 1200 a 5100 m.s.n.m, donde determinó áreas con aptitud forestal a partir de datos y aplicación de *softwares* SIG, utilizando la metodología de observación del paisaje-suelo, se zonificaron las áreas según características ecológicas de las especies forestales, como: altitud, pendiente, cobertura vegetal y suelo (textura, pH y profundidad). Utilizando la técnica de Proceso de Análisis Jerarquizado encontró las áreas óptimas para las siguientes especies: Aliso (*Alnus acuminata*), Colle (*Buddleja coriacea*), Tara (*Caesalpinia spinosa*), Pino (*Pinus radiata*), Quiñual (*Polylepis racemosa*), Eucalipto (*Eucalyptus globulus*) y Molle (*Schinus molle*).

Por su parte, Muñoz *et al.* (2015) identificaron zonas propicias para la creación de plantaciones comerciales de pino en la cordillera de Michoacán, México, utilizando las herramientas IDRISI 32 y Arcview. Consideraron los requerimientos ambientales específicos de cada especie de pino, que incluyen: precipitación, temperatura, características del suelo, altitud y grado de inclinación.

2.2. RECURSOS FORESTALES

Según la Ley N° 29763 Ley Forestal y de Fauna Silvestre (2011), los recursos forestales son: los bosques naturales, las plantaciones forestales, las tierras cuya capacidad de uso mayor sea forestal y para protección, con o sin cobertura arbórea y demás componentes silvestres de flora terrestre y acuática emergente, incluyendo su diversidad genética.

2.2.1. Tierras para la forestación o reforestación

Se refiere a aquellas que no cuentan con cobertura de bosque o donde la cobertura arbórea original ha sido erradicada en más del setenta por ciento. Dadas sus características edáficas y fisiográficas, así como su relevancia social, son idóneas para llevar a cabo tareas de forestación o reforestación con objetivos de protección o producción.

2.2.2. Plantaciones forestales

Son ecosistemas forestales creados por la intervención humana a través de la instalación de una o más especies arbóreas, ya sean nativas o introducidas, con el objetivo de producir madera o elementos distintos a la madera, para la protección, rehabilitación ecológica, recreación, suministro de servicios medioambientales o cualquier mezcla de los mencionados anteriormente.

2.2.3. Aptitud forestal

Según Salinas (2011), define aptitud forestal como las condiciones climáticas, de suelo y agua que presenta un sitio en especial para el crecimiento y desarrollo de una especie forestal.

2.2.4. Plantaciones de protección

Según la Ley N° 29763 Ley Forestal y de Fauna Silvestre (2011), Las plantaciones de protección se orientan a la protección de suelos frente a la erosión y al mantenimiento de las fuentes y cursos de agua, privilegiando el empleo de especies nativas y pudiendo incorporar especies exóticas dependiendo de las características ecológicas de cada zona.

2.3. SERVICIOS ECOSISTÉMICOS

Según la Ley N° 30215, Ley de mecanismos de retribución por servicios ecosistémicos (2014). Los servicios ecosistémicos comprenden los beneficios de carácter económico, social y medioambiental, tanto directos o indirectos, que los seres humanos reciben de la eficaz operación de los ecosistemas. Estos beneficios incluyen la regulación hídrica en las cuencas, la preservación de la biodiversidad, la captura de carbono, la belleza paisajística, la formación de suelos y el suministro de recursos genéticos, entre otros. Además, se señala que los servicios ecosistémicos pueden originarse tanto en ecosistemas naturales como en aquellos rehabilitados o constituidos a través de la acción humana.

Boyd y Banzhaf (2007) mencionan que, los beneficios que las sociedades adquieren de los ecosistemas, sus componentes y procesos, se conceptualizan a través de los servicios ecosistémicos. Estos representan el enlace entre los ecosistemas y las sociedades.

2.3.1. Servicios ecosistémicos de la cobertura vegetal arbórea

De acuerdo con Salazar (2015) la cobertura boscosa desempeña roles esenciales que están vinculados directamente a las cuencas hidrográficas, como, por ejemplo: la retención de lluvia en el dosel para su posterior almacenamiento en el suelo, suministrando agua a los ríos durante los períodos de sequía, incremento de la humedad a través de la evapotranspiración de las hojas, y la mejora de la calidad del suelo al evitar la erosión.

Por su parte Balvanera (2012) destaca que los bosques tropicales del planeta, gracias a su extensa distribución, alta diversidad y aporte a funciones esenciales del mundo como la regulación climática e hidrológica, proporcionan una gama de servicios ecosistémicos vitales.

Según Llerena y Yalle (2014), un ecosistema forestal conformado por bosques que se encuentran en laderas y valles de una cuenca andina, no solo proporciona una cantidad significativa de productos tangibles y valiosos comercialmente, sino que también ofrece servicios esenciales para los seres vivos que habitan en su entorno. Estos bosques se encargan de absorber el dióxido de carbono de la atmósfera que junto con el agua y luz se transforman en oxígeno, también reducen las temperaturas extremas en los microclimas de sombra bajo su dosel, aportarán hojarasca y materia orgánica al suelo lo cual incrementa la velocidad de infiltración del agua, mejorando su capacidad de almacenamiento y permitiendo que el agua fluya a través subsuelo hasta llegar a las partes bajas de la cuenca en volúmenes más regulares y constantes y de manera más limpia. También capturan agua adicional de las neblinas, protegen al suelo de la erosión y ayudan en la estabilización las laderas, brindan paisajes, escenarios naturales y hábitats aptos para la recreación y la salud.

La idea de que el bosque y sus suelos forestales son considerados como esponja hídrica por su capacidad de retener el agua y liberarla gradualmente, debe unirse al concepto de una bomba hidráulica, por el volumen de agua que mueve desde el suelo hacia la atmósfera Binns (1979) Bosch y Hewlett 1982, Hamilton y King 1983, Smiet 1987, Brooks *et al.* 1997, Calder 2000, Bruijnzeel 2004, DFID-FRP 2005, ETRN 2005706 y FAO 2006; citado por (Llerena *et al.*, PLANTACIONES FORESTALES, AGUA Y GESTIÓN DE CUENCAS 2007)

Sin embargo, un incremento en la cobertura vegetal de la cuenca con bosques mejorará su capacidad de infiltración y, el agua de lluvia que se infiltre al suelo incrementará progresivamente el caudal por la vía sub-superficial, produciendo un flujo de agua más limpio y regular (Dudley y Stolton 2003; citado por Llerena *et al.*, PLANTACIONES FORESTALES, AGUA Y GESTIÓN DE CUENCAS 2007)

De acuerdo con Landell-Mills y Porras (2002), existen servicios ambientales o ecosistémicos que son considerador de mayor importancia y que califican para sistemas de pago por servicios ambientales (PSA) y estos son: la captura y el almacenamiento de carbono; la biodiversidad, los servicios hidrológicos y las bellezas escénicas.

2.3.2. Mecanismos de retribución por servicios ecosistémicos

Se refiere a los planes, dispositivos, mecanismos e incentivos que se utilizan para producir, dirigir, transferir e invertir recursos tanto económicos como financieros y no financieros. En este contexto, se establece un pacto entre quienes aportan y quienes reciben a cambio un servicio ecosistémico, con el objetivo de conservar, recuperar y utilizar de manera sostenible las fuentes de dichos servicios ecosistémicos. (Ley N° 30215).

2.4. INFRAESTRUCTURA VERDE

Echavarría *et al.* (2015) mencionan que las obras de infraestructura verde abarcan un conjunto de medidas diseñadas para mejorar la capacidad de la naturaleza en cuanto a la producción de bienes y servicios ecosistémicos, tales como el flujo del agua, su regulación y calidad. De ahí que, la protección de las cuencas abastecedoras sea un factor esencial para garantizar la seguridad hídrica.

Algunas de las medidas de inversión que se realizan para salvaguardar, restaurar y conservar los escenarios naturales son; las actividades de reforestación, protección de bosques, riberas y humedales y paisajes naturales y demás acciones que contribuyen a proteger y/o restaurar el funcionamiento de los ecosistemas.

Por mucho tiempo la respuesta a la escasez del recurso hídrico en las cuencas que suministran este vital elemento fue la inversión en obras de “infraestructura gris”. Sin embargo, en los últimos años la tendencia es destinar fondos para mantener y proteger los ecosistemas naturales mediante acciones denominadas “infraestructura verde”.

Priorizar la inversión en acciones de conservación, rehabilitación o resguardo de los ecosistemas que suministran el recurso del agua es esencial. Se está entendiendo que proteger las fuentes de agua puede ser rentable que destinar fondos a infraestructura gris. La inversión en infraestructura verde se relaciona en gran parte con programas ambientales, que compensan a propietarios privados y comunitarios por la protección de los ecosistemas naturales que se encuentran en sus predios.

Echavarría *et al.* (2015) mencionan que únicamente el Perú posee un marco regulador para la inversión en infraestructura verde en el ámbito de suministro de agua y saneamiento.

2.5. LOS BOSQUES Y EL AGUA

Los bosques tropicales son ecosistemas muy importantes debido a que poseen una rica biodiversidad y proveen múltiples servicios ecosistémicos, cumplen un rol clave en el ciclo global del agua, mejorando positivamente la infiltración, incrementando la humedad del suelo, recargando los acuíferos y contribuyendo a la liberación gradual de agua en los ecosistemas (Calder y Bruce 2006)

La interceptación es un elemento crucial para entender los servicios que brinda el ecosistema vinculado con el agua en áreas con cobertura boscosa. La lluvia impacta sobre la cubierta vegetal, esta puede quedarse en el follaje, deslizarse por el tronco, caer desde las hojas por goteo, o simplemente no chocar con ningún elemento vegetal hasta llegar al suelo (Téllez y Boshell 2005). Cuando la precipitación se presenta como rocío, se forman cúmulos que atraviesan el dosel, las pequeñas gotas se adhieren a las superficies de las hojas y troncos, se juntan con otras hasta formar una gota lo suficientemente grande como para deslizarse hasta el suelo (Holder 2004)

Carvalho *et al.* (2014) mencionan que el balance hídrico en un ecosistema se ve influenciado por la estructura del bosque (densidad y cubierta), el balance hídrico de las especies y su tasa de crecimiento. En términos generales, las especies arbóreas de hoja caduca interceptan menores cantidades de agua comparadas con especies de hoja perenne, esta interceptación está alrededor del 18 por ciento y el 31 por ciento de total de precipitaciones respectivamente.

Sanchez *et al.* (2015) indican la cobertura vegetal que presenta un determinado suelo tiene un impacto significativo en la textura del mismo y define su estructura edáfica modificando sus propiedades hídricas. Por otro lado, Neary *et al.* (2009) sostienen que las propiedades físicas, químicas y biológicas de los suelos con cobertura forestal son particularmente aptas para suministrar agua de excelente calidad a los arroyos, regular la hidrología de la cuenca y ofrecer una variedad de hábitats acuáticos. El alto contenido orgánico de estos suelos favorece a la formación de una microfauna abundante y variada. Los sistemas radiculares que se forman

debajo de los bosques son extensos y tienen a ser más profundos que de las tierras de cultivo y pastizales. Todas estas condiciones biológicas contribuyen a la formación de suelos con elevada macroporosidad, baja densidad aparente, conductividades hidráulicas altamente saturadas y altas tasas de infiltración.

Las áreas sin cobertura vegetal son más susceptibles a la erosión, causada, entre otros factores, por la escorrentía superficial que se genera producto de la precipitación, que da origen a deslizamientos de tierra causando daños significativos a la población. Así mismo, esta agua se pierde de manera rápida debido a que no infiltra al encontrarse con un suelo compactado. Al respecto, Ataroff y Fermin (2000) sostienen que los árboles cumplen un rol preponderante en el ecosistema ya que contribuyen a la regulación de los flujos hídricos. En las áreas montañosas, este rol contribuye a disminuir la ocurrencia de crecidas máximas de los ríos y quebradas, así como deslizamientos de tierra en las laderas, y un mantenimiento más prolongado de los flujos subsuperficiales.

Kómetter y Gálmez (2017) mencionan que las interacciones entre los bosques y el agua son diversas, han sido sujetos a numerosas investigaciones y están influenciadas por varios factores, entre ellos los regímenes de precipitación, la geomorfología y la geología; que influyen en el almacenamiento y transporte del agua, así como la cobertura vegetal, que a menudo se ve afectada por el uso o manejo del suelo. Asimismo, sostienen que la restauración de los bosques favorece la producción de biomasa y brinda mejores condiciones para el desarrollo de la biodiversidad, causando un efecto en el suelo al incrementar las capas de hojarasca ricas en contenido orgánico que contribuyen al desarrollo de una micro y macrofauna diversa y abundante. Estas condiciones mejoran la porosidad del suelo y disminuyen la densidad, aumentando las tasas de conductividad hidráulica y de infiltración, lo que facilita una mayor recarga del agua en el suelo y en los acuíferos, contribuyendo así a regular los caudales, incluso en época de estiaje. Es decir, la restauración mejora la capacidad de regulación hídrica.

Paredes y Carlos (2006) sostienen que, a mayor cantidad de materia orgánica presente en el suelo, mejor será su estructura, favoreciendo la formación de una estructura más granular, lo que contribuye al desarrollo de un sistema radicular denso y profundo, y generando una mayor capacidad de infiltración y almacenamiento del agua. Además, reduce la escorrentía

superficial y de la erosión al absorber e interceptar la lluvia y funcionar como barrera, reteniendo así el agua y permitiendo que haya más tiempo para la infiltración. Una vez que el agua ingresa al suelo, una porción es aprovechada por las plantas y devuelta a la atmósfera a través del proceso de transpiración, mientras que otra porción se almacena en el terreno.

Segura *et al.* (2002) estimaron una disminución total de 0,0679 por ciento del rendimiento hídrico, por el aumento en uno por ciento de la cobertura forestal. No obstante, esto se equilibra ya que el aumento en la cobertura forestal reduce la temperatura superficial del suelo y elimina los efectos del viento, minimizando así la evaporación del agua del suelo. Como resultado, la superficie del suelo se conserva más fresca y la tasa de evaporación del agua del suelo disminuye poco a poco, lo que permite mantener o incluso aumentar los flujos de agua durante los periodos de estiaje.

Kómetter y Gálmez (2017) indican que la restauración de los bosques provee muchos beneficios, entre los cuales podemos tener; la mejora de la calidad del agua, debido principalmente a que la interceptación de la precipitación por medio del dosel disminuye el impacto que ocasionan las gotas de lluvia en el suelo, impidiendo así su remoción.

Barrantes (2006), citado por Kómetter y Gálmez (2017), sostiene que la restauración de bosques en cuencas degradadas es una estrategia que contribuye a la conservación de las aguas superficiales y subterráneas, además de prevenir la erosión del suelo. Estos beneficios implican un costo inherente que debe ser tomado en cuenta dentro de la estructura de valoración económico-ecológica para el uso del agua.

Célleri (2009) menciona que, los bosques contribuyen a regular el ciclo hidrológico, gracias a que el ecosistema almacena agua durante la época lluviosa y la libera lentamente en los periodos secos. Es decir, el ecosistema proporciona un equilibrio natural entre caudales de época lluviosa con caudales de época seca. Además, los caudales de crecida estarán controlados hasta un determinado punto. Por lo tanto, se puede concluir que, al preservar un ecosistema en su forma natural, todos los servicios hidrológicos estarán en equilibrio.

Según una encuesta realizada por Huasasquiche y Kómetter (2017), citada por Kómetter y Gálmez (2017), a pobladores de una comunidad en el departamento de Apurímac,

manifestaron que las especies forestales más importantes para la captación de agua son: “Lambras” o “Aliso” (*Alnus acuminata*), “Layán” o “Sauco” (*Sambucus nigra*), “Pisonay” (*Erythrina falcata*), “Chamchi” (*Weinmania sp.*), “Quisa quisa” (*Phenax sp.*), “Yareta” (*Smallanthus parviceps*) y “Yoroma” (*Morella pubescens*).

Pizarro *et al.* (2005) mencionan que la cobertura forestal aporta materia orgánica al suelo haciendo que su textura se vuelva más granulosa, incrementando la capacidad de infiltración y recarga de acuíferos subterráneos.

Por su parte FAO (2009) menciona que las cuencas de captación boscosa proporcionan una gran cantidad del agua necesaria para satisfacer las demandas domésticas, agrícolas, industriales y ecológicas de zonas de río arriba tanto como las de río abajo.

Ochoa-Tocachi *et al.* (2016) realizaron un estudio sobre los impactos que genera un determinado uso del suelo sobre la respuesta hidrológica de cuencas andinas. En su estudio señalan que plantaciones forestales que se realizan con especies exóticas, tales como el pino y el eucalipto, influyen de forma negativa en el almacenamiento de agua en el suelo como en su producción. No obstante, también destacaron que existen estudios que han demostrado que las plantaciones que incorporan especies nativas o combinaciones de especies pueden contribuir a estabilizar los caudales, en comparación con las plantaciones que están dominadas por especies exóticas.

Así mismo se presenta la Figura 1 donde muestran los impactos del uso del suelo.

Factores Hidrológicos	Natural	Cultivos	Pastoreo	Forestación
RENDIMIENTO HÍDRICO				
Alto volumen de precipitación (lluvia, neblina, etc)	↑			
Vegetación que captura la neblina	↑	↓		↑
Baja evapotranspiración (consumo de agua)	↑	↓		↓ ↓
REGULACIÓN HÍDRICA				
Alta capacidad de infiltración de los suelos	↑	↓	↓ ↓	↑
Baja intensidad de la lluvia que alcanza el suelo				↑
Alta capacidad de almacenamiento en los suelos	↑	↓	↓ ↓	↑ ↓
CALIDAD DE AGUA				
Baja carga de compuestos químicos y biológicos	↑	↓	↓	
Estado de cobertura vegetal protectora	↑	↓	↓	↑
Topografía (fuerte pendiente en los suelos)		↑		
Leyenda:	↓ Impactos negativos	↑ Impactos positivos		

Figura 1. Impacto del uso del suelo

Fuente: Ochoa-Tocachi *et al.* (2016)

2.6. ESPECIES FORESTALES

2.6.1. Quinual (*Polylepis incana*)

La presencia actual de los bosques de *Polylepis* es bastante limitada. Hay ciertas áreas donde los bosques son relativamente extensivos, como en la cordillera blanca, pero en su gran mayoría podemos encontrar estos bosques conformando pequeños rodales en laderas rocosas y quebradas o matorrales abiertos en laderas montañosas (Kessler 2006).

Fjeldsa *et al.* (1996) indican que este tipo de bosques son importantes para mejorar la capacidad de retención de agua en el suelo, reducen la erosión al regular la escorrentía del agua y facilitan el almacenamiento de sedimentos y nutrientes. Asimismo, mencionan que se caracterizan por la gran biodiversidad que albergan entre especies arbóreas, arbustivas y herbáceas constituyendo un gran reservorio de agua. Sin embargo, señalan que alrededor del

98 por ciento de estos bosques han desaparecido en Perú debido a actividades antrópicas como la quema de pastos.

Por su parte Llerena *et al.* (2017) menciona que el “Quinual” es una especie que logrado adaptarse a las condiciones climáticas muy frías, caracterizado por su corteza externa de múltiples capas delgadas. Este árbol juega un papel muy importante en la protección de las cabeceras de cuencas, arroyos de las partes altas y laderas, y se encuentra entre las especies nativas más utilizadas en los programas de reforestación dentro de la región andina.

Kessler (2006) menciona que, por encima de los 3000-3500 m.s.n.m, la vegetación de los Andes centrales es primordialmente de zonas de cultivo, pastizales y áreas con cobertura arbustiva. Es difícil encontrar áreas con cobertura arbórea y las zonas con esta cobertura pertenecen a especies exóticas de los géneros *Eucalyptus* y *Pinus*. Los bosques con especies nativas son aún más raros y suelen estar limitados a sitios específicos como laderas rocosas o quebradas. Estos bosques relictos están conformados principalmente por especies del género *Polylepis*, aunque también es posible encontrar especies leñosas como *Buddleja*, *Clethra*, *Gynoxys*, *Podocarpus* o *Prumnopitys*. Dichos bosques desempeñan un papel clave en la ecología altoandina, como hábitat de muchas especies de flora y fauna y como fuente de vital de recursos para los residentes locales.

Por su parte Lao *et al.* (1990) sostienen que el género *Polylepis* se sitúa en el Perú abarcando altitudes de 2800 a 4800 m.s.n.m. Es una de las pocas especies forestales de porte arbóreo que pueden crecer en la puna, en ocasiones cercanas a las nieves perpetuas de la cordillera de los andes, estableciendo así el límite máximo de altitud en la distribución de las especies de la región altoandina.

Los beneficios de estos bosques son muchos, se resaltan los siguientes:

De acuerdo a Tobón (2009), los bosques de queñual debido a sus características ecológicas cumplen un rol importante en el ciclo hidrológico de las regiones altoandinas, cumpliendo la función de “reservorios” que regulan el nivel hídrico del ecosistema durante la época de estiaje. Esto se debe a sus particularidades, donde las principales fuentes de agua provienen de la lluvia y niebla que, al entrar en contacto con el dosel y su superficie se canaliza hacia el interior del

bosque. La mayor del agua que se retiene se da gracias a la presencia de plantas epifitas; que están asociados a los bosques altoandinos.

Por su parte Ortega *et al.* (2002) menciona que, los bosques altoandinos son importantes ya que contribuyen en la regulación de los caudales, en el rendimiento hídrico de las cuencas, en el control de la erosión y la reducción de las inundaciones. La pérdida del área con cobertura boscosa puede generar la disminución en los caudales y cambios en la dirección y magnitud de los flujos hídricos hacia los ríos y las quebradas. Los principales problemas que se dan por el cambio de uso del suelo, son: erosión, deslizamientos de tierras, inundaciones, contaminación, degradación del régimen hidrológico y la escasez de agua. La erosión del entorno natural en las cuencas altoandinas se genera principalmente por: pendientes pronunciadas, ocurrencia de precipitaciones con fuerte erosividad y, por lo tanto, alta erodabilidad, así como largos periodos de lluvias que generan grandes movimientos en masa.

Arcos (2010) realiza una investigación en el páramo de Paluguillo, en la región de Papallacta en Pichincha, Ecuador, en la que mencionan que en suelos sin cobertura las tasas de infiltración son significativamente menores, además de determinar que el bosque de *Polylepis* fue el sistema de uso de suelo con mayor tasa de infiltración. Entre los distintos usos de suelo comparados se encuentran pastizales, zonas arbustivas, fragmentos de bosques de altura, zonas anteriormente quemadas, terrenos agrícolas y hasta caminos.

Así mismo, Gonzales (2015) en un estudio realizado en el Parque Nacional Huascarán, encontró que, los suelos con cobertura arbórea de *Polylepis* de 11 y 29 años presentan una r tasa de infiltración superior a la de los suelos que carecen de cobertura forestal.

En la siguiente figura se puede observar la distribución de esta especie, encontrando a *Polylepis incana* en la región Lima entre los 3000 a 4200 msnm según (Mendoza y Cano 2011).

ESPECIES	ALTITUD (m)	DEPARTAMENTO
<i>Polylepis flavipila</i> (Bitter) M. Kessler & Schmidt-Leb	3650-4100	HV,LI
<i>Polylepis incana</i> Humboldt, Bonpland & Kunth	3000-4200	AN,AP,AY,CU,HU,JU,LI,PA,PU
<i>Polylepis incarum</i> (Bitter) M. Kessler & Schmidt-Leb	3100-4200	CU,PU
<i>Polylepis lanata</i> (Kunze) M. Kessler & Schmidt-Leb	2900-4100	AP,AY,CU
<i>Polylepis microphylla</i> Pilger	3200-4000	AR,CU,LI
<i>Polylepis multijuga</i> Pilger	2200-3600	AM,CA,LA
<i>Polylepis pauta</i> Hieron	1800-4000	AY,CU,JU,SM
<i>Polylepis pepeí</i> B.B Simpson	3900-4500	AY,CU,PU,SM
<i>Polylepis racemosa</i> Ruiz & Pav	2900-4000	AN,AP,AY,CA,CU,HU,JU,LI,LL,PA
<i>Polylepis rugulosa</i> Bitter	3000-4600	AR,MO,TA
<i>Polylepis sericea</i> Wedd	2000-4100	AN,CU,JU,LL
<i>Polylepis subsericans</i> J.F Macbride	2900-5100	AP,AY,CU
<i>Polylepis tarapacana</i> Philippi	4200-4800	TA
<i>Polylepis tomentella</i> weddell	3500-4500	AP,AR,AY
<i>Polylepis triacandra</i> Bitter	3500-3900	PU
<i>Polylepis weberbaueri</i> Pilger	2500-4200	AN,CA,LA,LI,PI

Figura 2. Especies del género *Polylepis* reportadas para Perú

Fuente: Mendoza y Cano (2011)

2.6.2. Colle (*Buddleja coriácea*)

Idme (2022) menciona que esta especie ayuda a la retención de la humedad, disminuyendo la velocidad de infiltración, contrarrestando así el poder erosivo del agua, especialmente en zonas de pendiente pronunciada.

Arica (2003) menciona que el rango de altitud para esta especie va desde los 3400 hasta los 4500 msnm y que es una especie plástica pudiendo adaptarse bien en suelos con pedregosidad media.

2.6.3. Lloque (*Kageneckia lanceolata*)

Reynel y León (1990) señalan que esta especie es de gran interés desde el punto de vista agroforestal y para el repoblamiento de la zona andina. Es una especie apropiada para cercos vivos, tiene crecimiento rápido y se adapta en zonas áridas y semiáridas. También son utilizadas en prácticas vinculadas con la protección de suelos.

Estos árboles ayudan a regular el clima, evitan la erosión de los suelos y acumulan grandes cantidades de agua, que, tras el proceso de infiltración a través del suelo, alimenta los manantiales y puquios que benefician a la comunidad y a todos los usuarios de la cuenca del río Cañete. (Comunidad campesina San Lorenzo de Alis s/f)

2.6.4. Chachacomo (*Escallonia myrtilloides*)

Reynel y León (1990) mencionan que, debido a que posee un buen sistema radicular (raíces largas y pivotantes) esta especie es muy útil para estabilizar muros y andenes empircados. Además, se emplean en zonas andinas combinadas con cultivos agrícolas o manejado bajo silvopasturas.

Esta especie y el Colle fueron utilizados en el proyecto de inversión: “recuperación del servicio ecosistémico de regulación hídrica en las microcuencas de Toccohuanca, Llancama, Llanquimallo, Taucabamba y Miskahuaycco de la cuenca media del Apurímac - en los distritos de Paruro, Omacha, Pillpinto y Chinchaypujio - provincia de Paruro y Anta - departamento de Cusco”

2.7. VARIABLES CONSIDERADAS EN LOS REQUERIMIENTOS AMBIENTALES DE LAS ESPECIES

Louman *et al.* (2001) mencionan tres factores ambientales más cruciales que tienen impacto sobre la composición florística:

2.7.1. Clima

Según Holdridge (2000), uno de los principales factores que influyen en la distribución natural de la vegetación, es el clima. Por su parte Walter (1979) menciona que la actividad de las comunidades vegetales se ve afectada, entre otros factores por las variaciones en el clima, principalmente aquellos que se producen anualmente, como el ciclo térmico y pluviométrico que dan lugar a estaciones frías y/o secas.

a. Precipitación

La variación de las precipitaciones a través de los niveles de altitud tiene un impacto en la composición de la vegetación. (Holdridge 2000)

No obstante, no solo la cantidad de precipitaciones afecta la conformación de los diferentes tipos de bosques, sino que su distribución a lo largo del año también juega un papel crucial. (Sánchez 1981).

b. Temperatura

A medida que la altitud se incrementa, la temperatura disminuye, lo que es uno de los factores que restringen el desarrollo y la distribución de los bosques de bosques montanos tropicales ya que existe una marcada disminución caída en la diversidad de especies con el incremento de la altitud (Grubb 1971) (Givnish 1999).

2.7.2. Suelo

El suelo juega un papel importante en la distribución de las especies particularmente en las regiones tropicales, donde la diversidad edáfica parece ejercer un impacto considerable en la distribución de la vegetación. Mucha de la variación espacial es atribuible a la presencia habitual de mosaicos edáficos (variación de química de suelo y textura, drenaje y topografía) (Clark *et al.* 1995).

a. pH

La medición del pH del suelo es probablemente la más sencilla que se puede llevar a cabo para identificar las propiedades de los suelos. Esta medición proporciona una imagen mucho más completa de las cualidades del terreno que simplemente clasificarlo como suelo ácido o alcalino. Por ejemplo, el pH tiene una fuerte relación con la accesibilidad de los nutrientes o con el potencial de toxicidad que otros elementos pueden generar. (Bazán 2017).

La USDA (1999) menciona que el pH del suelo es un parámetro que indica el nivel de acidez o alcalinidad y tiene un impacto directo en la accesibilidad de los nutrientes, la actividad microbiana y la solubilidad de minerales del suelo. Este pH se altera debido a la precipitación y la temperatura, que afectan el grado de lixiviación y la meteorización de los minerales del suelo.

b. Textura

La textura es una propiedad muy estable, por ello es muy difícil de cambiar; sin embargo, puede modificar sus características inherentes como aumentar su permeabilidad.

La utilidad de saber la textura o clase textural de un suelo radica en que facilita la inferencia aproximada de las características generales del suelo, permitiendo adaptar las prácticas de manejo requeridas (cultivo, riego y fertilización); asimismo, se puede emplear para calificar y estimar terrenos según su potencial de uso. (Henríquez & Cabalceta 1999)

c. Conductividad eléctrica

Según la USDA (1999), poseen sales que resultan fundamentales para el desarrollo de las plantas. Cuando estas sales se presentan en exceso inhiben el crecimiento de las plantas, además de obstaculizar la absorción de agua en el suelo y propiciar la formación de compactación superficial.

En general los valores de CE (1:1) entre 0 y 0.8 dS/m son aceptables para el crecimiento de los cultivos en general. Pero se debe mencionar que, para interpretar la calidad de suelo de un determinado sitio, no solo basta con conocer los parámetros, también se debe analizar el uso de las tierras.

Por su parte Castellanos (2000) menciona que es crucial entender este parámetro porque asiste en la selección del cultivo y variedad a establecer en función de su resistencia a los grados de salinidad en el terreno. La salinidad reduce el desarrollo de

los cultivos al causar una reducción en la cantidad de agua disponible, generando efectos parecidos a los ocasionados por una sequía.

CE _e	Condiciones de salinidad y efecto sobre las plantas
<1	Suelo libre de sales. No existe restricción para ningún cultivo.
1-2	Suelo muy bajo en sales. Algunos cultivos muy sensibles pueden ver restringidos sus rendimientos.
2-4	Suelo moderadamente salino. Los rendimientos de cultivos sensibles pueden verse afectados en su rendimiento.
4-8	Suelo salino. El rendimiento de casi todos los cultivos se ve afectado por esta condición de salinidad.
8-16	Suelo altamente salino. Solo los cultivos muy resistentes a la salinidad pueden crecer en estos suelos.
>16	Suelo extremadamente salino. Prácticamente ningún cultivo convencional puede crecer económicamente en estos suelos.

Figura 3. Clasificación de suelos en base a su CE y el efecto general sobre los cultivos

Fuente: Castellanos (2000)

2.7.3. Topografía

La topografía es responsable de aspectos como; la orientación, elevación y pendiente, elementos físicos que constituyen un complejo gradiente que ejerce gran impacto sobre la composición de especies de las comunidades vegetales (Vetaas y Chaudhary 1998)

a. Altitud

Las variaciones en la altitud pueden crear barreras ambientales, afectando el crecimiento y desarrollo de las especies vegetales. (Murga *et al.* 2021)

Los cambios en la altitud tienen un impacto significativo en las condiciones climáticas, las características y la fauna del suelo, en la estructura poblacional y en la fisiología de las especies. Adicionalmente, estos actúan como barreras, generando una diversidad ambiental e interactuando con los procesos ecológicos, biogeográficos y evolutivos en una escala local y temporal. (Terra *et al.* 2015), (Asner y Martin 2016), (Asner *et al.* 2017)

b. Pendiente

Según Ibañez *et al.* (2011) la pendiente se refiere a relación que existe entre la diferencia de altura y el recorrido horizontal que necesitamos hacer. Usualmente se representa en porcentaje o grados. La aplicación en el terreno se fundamenta en el control del desnivel existente en una ladera mediante las cotas y su variación espacial.

Por su parte Beláustegui (1999) sostiene que la pendiente influye en la formación de suelos y tiene un impacto significativo en el proceso de erosión. Esto se debe a que a medida que la pendiente se vuelve más pronunciada, la velocidad del agua es mayor u la escorrentía aumenta, lo que dificulta la infiltración del agua a través del suelo

Mientras que Harold (1984) sostiene que, la pendiente tiene un impacto significativo sobre la vegetación, ya que mientras mayor sea la pendiente menor será la disponibilidad hídrica, aumentara el riesgo de escorrentía lo que puede generar erosión.

En la Tabla 1 se muestra el cuadro del rango de pendientes, según el (Reglamento de clasificación de tierras por su capacidad de uso mayor 2011).

Tabla 1. Rangos de clasificación de pendientes

Pendiente (%)	Clasificación
0 – 2	Plano
2 – 4	Ligeramente inclinado
4 – 8	Moderadamente inclinado
8 – 15	Fuertemente inclinado
15 – 25	Moderadamente empinado
25 – 50	Empinado
50 – 75	Muy empinado
> 75	Extremadamente empinado

Fuente: Reglamento de clasificación de tierras por su capacidad de uso mayor (2011)

2.8. COBERTURA DE LA TIERRA

Para Di Gregorio (2005), la cobertura de la tierra se refiere a la capa (bio) física que se puede observar en la superficie terrestre. La cobertura se interpreta como una unidad delimitable que surge a partir de un análisis de respuestas espectrales, las cuales son determinadas por sus características fisionómicas y ambientales, y son diferenciables en comparación con la unidad próxima (IDEAM 1997).

León *et al.* (2010) mencionan que no existen muchos estudios sobre flujos aéreos y subsuperficiales en los bosques altoandinos, a pesar de su relevancia en la regulación de caudales de fuentes que suministran de agua a zonas densamente pobladas, debido a su ubicación en las partes altas de las cuencas hidrográficas.

Según Alegre y Rao (1996) los bosques que poseen una capa gruesa de manto orgánico suelen tener tasas elevadas de infiltración porque el suelo se encuentra protegido del impacto de la lluvia, por lo tanto, conserva el agua de manera eficiente ya que se tienen menores pérdidas por escorrentía superficial.

2.8.1. Metodología de clasificación de la cobertura de la tierra

Para clasificar las coberturas de la tierra se utilizó como mapa base el mapa de cobertura vegetal elaborado por el MINAM (2015) y se realizó una adaptación usando la metodología *Corine Land Cover* que es usada para la elaboración de mapas de cobertura y uso de la tierra.

Esta metodología utiliza una leyenda jerarquizada que facilita la descripción, caracterización, clasificación y comparación de los atributos de la cobertura y uso del suelo, interpretadas a través del uso de imágenes satelitales. Esta leyenda vincula distintos niveles de detalle espacial (escala espacial) con diferentes niveles de detalle temático (niveles de la leyenda jerárquica) (IDEAM, IGAC Y CORMAGDALENA 2008)

El MINAM (2015) realizó una propuesta de leyenda de coberturas vegetal para Perú, el cual está dividido en niveles el cual se adaptó para la clasificación en el presente trabajo

Tabla 2. Leyenda Corine Land Cover

Nivel I	Nivel II	Nivel III
Áreas artificializadas	Áreas urbanizadas	Tejido urbano continuo, tejido urbano discontinuo
	Áreas industriales e infraestructura	Áreas industriales o comerciales, red vial, ferroviaria y terrenos asociados, áreas portuarias, aeropuertos, obras hidráulicas
	Áreas de extracción de minería e hidrocarburos y escombreras	Áreas de extracción de minería e hidrocarburos, áreas de disposición de residuos
	Áreas verdes artificiales no agrícolas	Áreas verdes urbanas, instalaciones recreativas
Áreas agrícolas	Cultivos transitorios	
	Cultivos permanentes	
	Pastos	
	áreas agrícolas heterogéneas	
Bosques y áreas mayormente naturales	Bosque	Bosque denso bajo, bosque abierto bajo, bosque denso alto, bosque abierto alto, bosque fragmentado
	Bosques plantados	
	Áreas con vegetación herbácea y/o arbustiva	Herbazal, arbustal, vegetación secundaria o en transición, vegetación arbustiva/herbácea,

		arbustal/área intervenida, arbustal-herbazal/área intervenida
	Áreas sin o con poca vegetación	Áreas arenosas naturales, afloramiento rocoso, tierras desnudas (incluye áreas erosionadas naturales y también degradadas), áreas quemadas, glaciares, salares
Áreas húmedas	Áreas húmedas continentales	Áreas pantanosas, turberas y bofedales, vegetación acuática sobre cuerpos de agua,
	Áreas húmedas costeras	Pantanos costeros, salitral, sustratos y sedimentos expuestos en bajamar
Superficies de agua	Aguas continentales	Ríos (50m), lagunas, lagos, ciénagas, canales, cuerpos de agua artificiales
	Aguas costeras	Lagunas costeras, mares y océanos, estanques para acuicultura marina

Fuente: Adaptado del MINAM (2015)

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. ÁREA DE ESTUDIO

3.1.1 Ubicación geográfica

La unidad hidrográfica del río Santa Eulalia se ubica en el departamento de Lima, provincia de Huarochirí. Tiene una superficie de 1077,38 km² que representa el 30,75 por ciento del área total de la cuenca del río Rímac y un perímetro de 185,63 km. Dentro de la subcuenca Santa Eulalia se encuentran los distritos de, Huanza, Laraos, Carampoma, San Juan de Iris, Huachupampa, San Antonio, San Pedro de Casta, Callahuanca, San Mateo de Otao, Santa Eulalia y una pequeña parte de Lurigancho.

Limita por el noroeste con la provincia de Canta, por el oeste con Lima, por el Noreste con Yauli y por el sureste con los distritos de Chicla, San Mateo y Matucana.

La cuenca en estudio tiene una forma rectangular alargada (Noreste a Noroeste), donde podemos encontrar lagunas, manantiales, ríos y quebradas, como se muestran en la Figura 4, los cuales ven disminuidos su caudal durante los meses de estiaje.

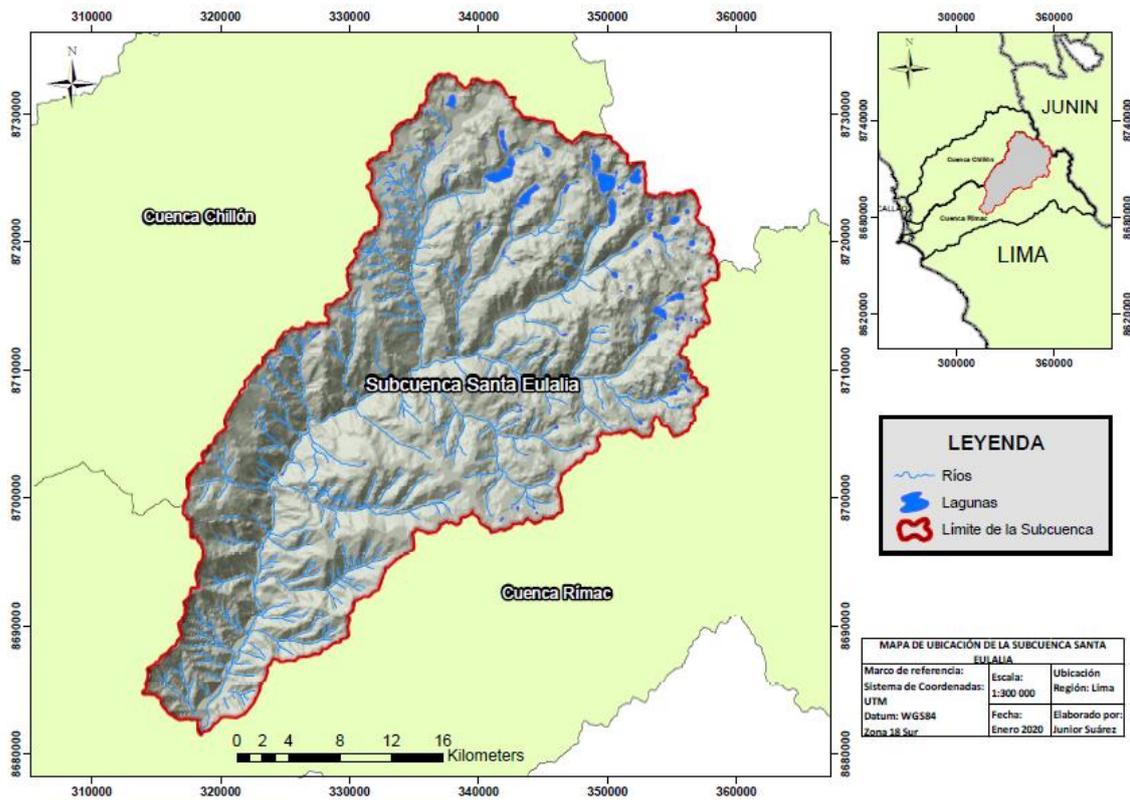


Figura 4. Mapa de ubicación del área de estudio

Fuente: Elaboración propia

3.1.2 Precipitación en la subcuenca Santa Eulalia

Manco y Paucar (2015) realizaron un estudio en la subcuenca del río Santa Eulalia en la que obtuvieron la precipitación total mensual (mm) y el promedio multimensual desde el año 1990 hasta el 2010 tal como se muestra en la Tabla 1. Estos datos son el resultado de la completación y extensión de los registros de las estaciones meteorológicas.

Tabla 3. Precipitación total mensual (mm) – promedio multimensual (1990-2010)

Estación	Meses												Anual
	Ene	Feb	Mar	Abril	Mayo	Jun	Jul	Agos	Sep	Oct	Nov	Dic	
Casapalca	108.50	98.38	103.62	47.47	15.70	4.00	4.79	11.73	23.46	59.34	54.06	92.98	624.04
Matucana	61.23	79.46	80.04	23.39	0.97	0.19	0	0.17	0.71	9.81	15.96	41.38	313.31
Milloc	152.4	140.94	148.54	64.56	20.91	8.78	8.27	16.24	40.61	72.83	87.64	131.82	893.54
Pariacancha	109.07	108.16	125.87	50.13	12.74	3.17	2.22	4.71	22.38	57.24	57.77	88.06	641.52
Río Blanco	95.92	111.96	114.77	35.4	7.56	1.27	0.43	2.21	12.32	32.7	46.58	82.82	543.94
Arahuay	56.17	88.15	86.79	19.7	0.94	0	0	0	0.96	5.1	10.4	30.61	298.82
Canchacalla	60.8	77.81	78.26	15.39	1.04	0	0	0	0.91	7.36	8.87	36.13	286.57
Carampoma	86.71	93.54	92.81	32.45	5.41	0.32	0.2	0.57	6.36	24.95	30.11	63.13	436.56
Lachaqui	95.54	129.25	142.06	52.4	7.05	0.03	0	0.42	6.13	22.54	36.59	64.14	556.15
Santiago de Tuna	47.20	80.22	72.66	24.64	2.51	1.17	1.55	1.45	2.44	4.06	12.34	41.09	291.33
Santa Eulalia	8.77	12.63	7.75	0.72	0.29	0.01	0	0	0.09	0.24	0.54	2.93	33.97
Chosica	5.62	8.12	4.87	1.00	0.31	0.01	0.03	0.02	0.13	0.11	0.34	1.24	21.80

Fuente: Manco y Paucar (2015)

SENAMHI (2016) realizó un estudio de la vulnerabilidad climática de los recursos hídricos en las cuencas de los ríos Chillón, Rímac, Lurín y la Cuenca Alta del Mantaro. En el cual señala que la época lluviosa en el área de estudio, al igual que en toda la sierra del Perú, comienza en setiembre, intensificándose durante los meses de enero y febrero para luego disminuir entre abril y mayo. La distribución espacial de la precipitación en estas cuencas muestra una relación con la altitud, especialmente durante la época lluviosa (setiembre – abril). En otras palabras, los mapas de isoyetas demuestran un aumento de las precipitaciones de Este a Oeste conforme aumenta la altitud.

Se ha observado que la subcuenca del Rímac es la que recibe la mayor cantidad de precipitación anual, con un total acumulado de 701.0 mm al año. Por otro lado, la subcuenca del río Santa Eulalia recibe una media anual de precipitación de 541.0 mm, mientras que la subcuenca del medio Rímac, otra extensión del Rímac, tiene una media anual de precipitación de 327.0 mm.

Asimismo, se elaboró un mapa de la distribución espacial de la precipitación media anual, el cual se muestra en la siguiente figura:

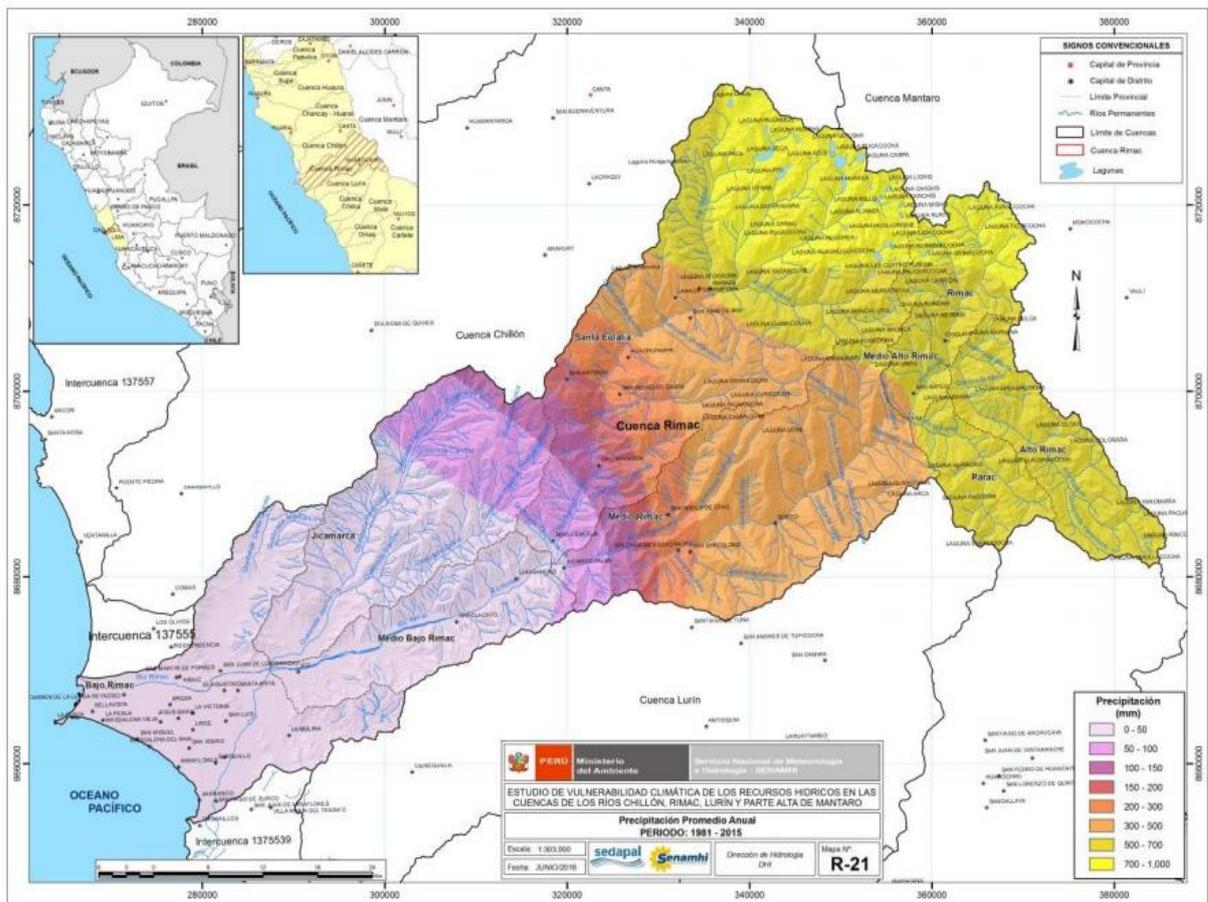


Figura 5. Distribución de la precipitación en la cuenca del río Rímac

Fuente: SENAMHI (2016)

Según la figura anterior para la subcuenca Santa Eulalia, la precipitación varía desde los 50 mm en la parte baja hasta los 1000 mm en la parte alta.

Por su parte la ANA (2010) menciona que las características estacionales del clima en la región de la cuenca del río Rímac se reflejan sobre todo en cambios en el patrón de las precipitaciones. Asimismo, presenta un gráfico de la variación mensual de la precipitación – promedio multianual, el cual se elaboró utilizando estaciones de la cuenca Rímac y cuencas vecinas, el cual se muestra en la Figura 6.

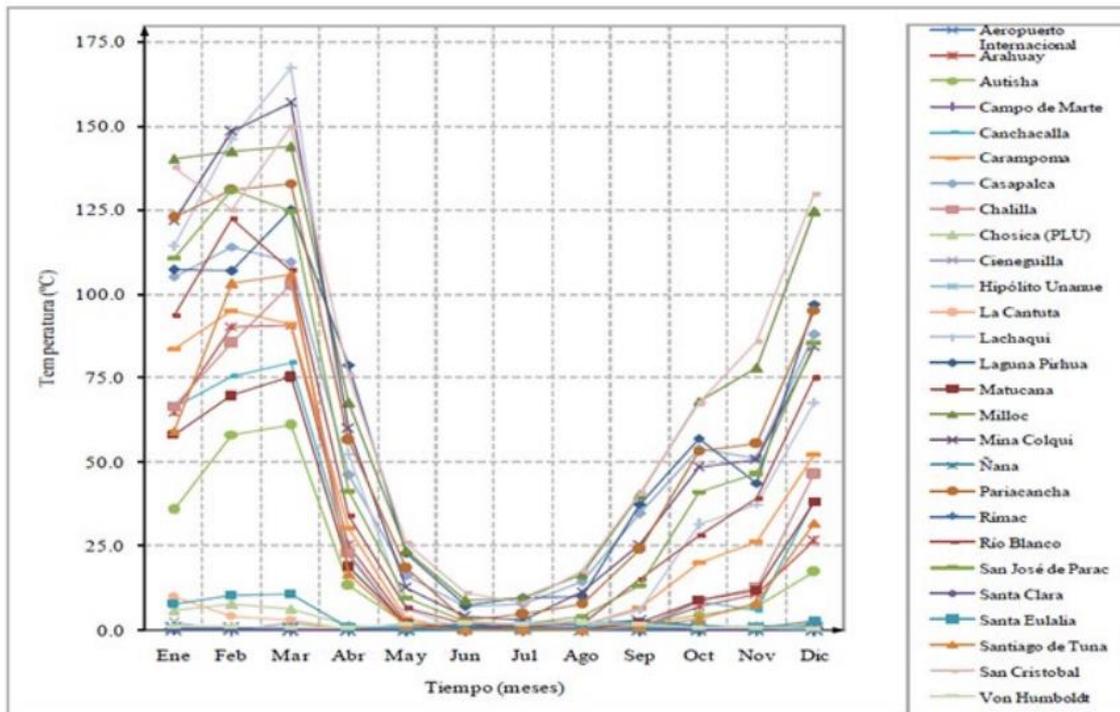


Figura 6. Variación mensual de la precipitación – promedio multianual

Fuente: ANA (2010)

3.1.3 Variación espacial de la precipitación respecto a la altitud

Manco y Paucar (2015) determinaron la relación que existe entre la precipitación media anual (mm) respecto a la altitud sobre el nivel del mar (m.s.n.m.), para lo cual evaluaron tendencias y el comportamiento de los datos, encontrando que la que más se ajusta es la del tipo exponencial como se muestra en la Figura 7.

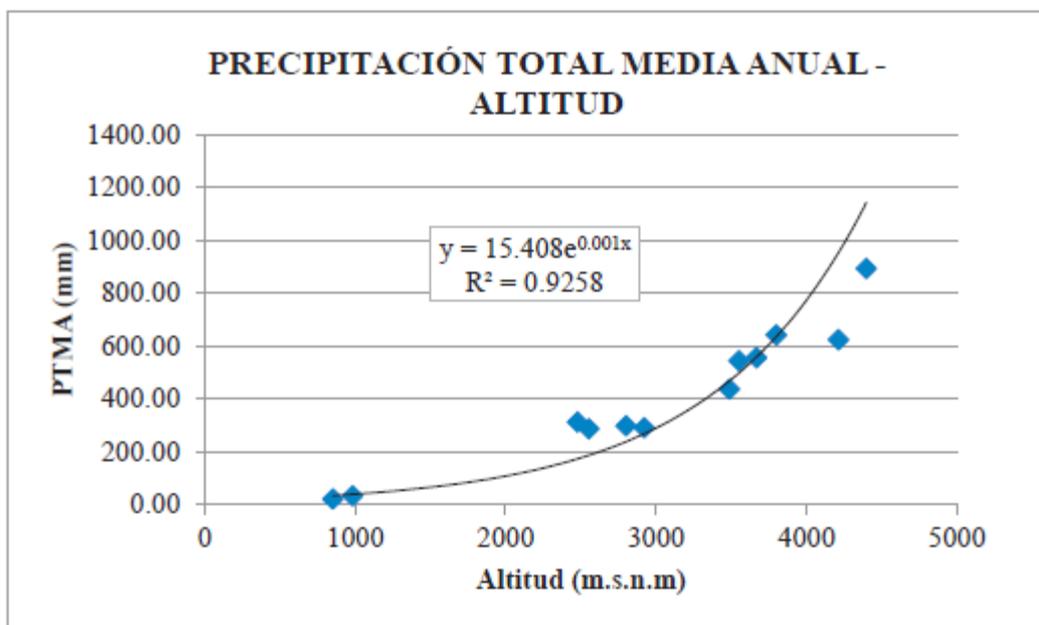


Figura 7. Variación de la precipitación con respecto a la altitud

Fuente: Manco y Paucar (2015)

3.1.4 Oferta hídrica en la sub cuenca Santa Eulalia

Manco y Paucar (2015) dividieron la cuenca en tres partes (subcuenca alta, media y baja), como se muestra en la Figura 8 y calcularon que la subcuenca alta tiene una superficie de 543,3 km² presentando una precipitación media anual de 726,5 mm, la subcuenca media con una extensión de 426,4 km² presenta una precipitación media anual de 436,5 mm y finalmente la subcuenca baja con un área de 107,5 km² y una precipitación media anual de 145,02 mm.

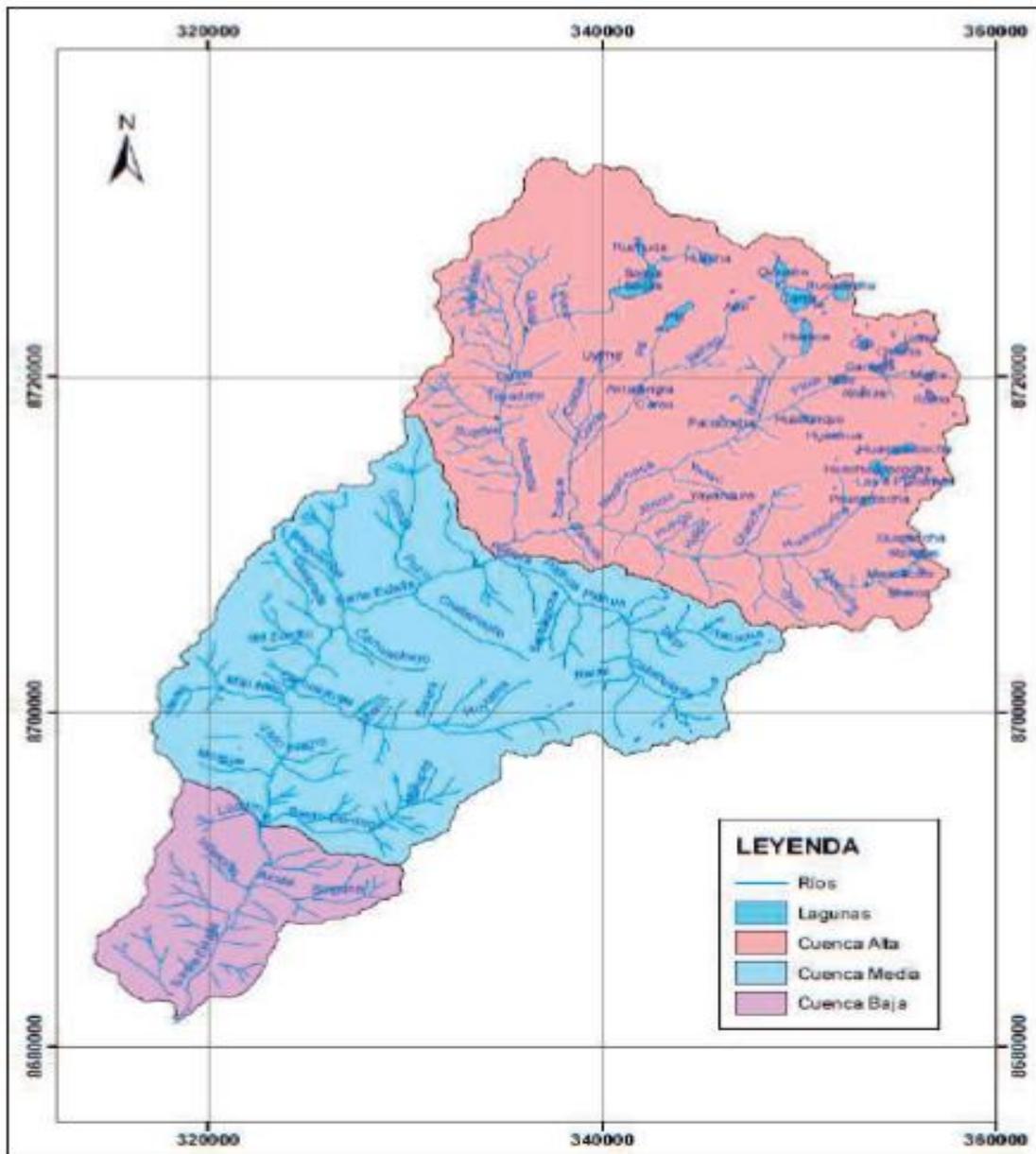


Figura 8. División de la subcuenca Santa Eulalia

Fuente: Manco y Paucar (2015)

3.1.5 Fuentes de agua superficial en la subcuenca Santa Eulalia

Manco y Paucar (2015) distinguen 6 tipos de Fuentes de agua superficial: quebradas, manantiales, lagunas represadas, lagunas naturales, ríos y presas. En la unidad hidrográfica Rímac existen en total 630 Fuentes de recurso hídrico superficial, estando 336 de estas

ubicadas en la subcuenca Santa Eulalia, lo cual representa el 53,3 por ciento del total. La distribución de las Fuentes de agua se muestra en la Figura 9.

UNIDAD HIDROGRÁFICA	CÓDIGO	NUMERO DE FUENTES DE AGUA SUPERFICIAL						TOTAL	PORCENTAJE DE LA CUENCA DEL RÍO RÍMAC (%)
		Quebradas	Río	Laguna natural	Laguna represada	Presa	Manantial		
Río Santa Eulalia	1375544	141	7	77	26	2	83	336	53.3

Figura 9. Inventario de Fuentes de agua superficial en subcuenca Santa Eulalia

Fuente: Manco y Paucar (2015)

3.1.6 Temperatura

En el área de la cuenca del río Rímac se presentan las temperaturas medias más bajas en el mes de julio, mientras que las más elevadas se pueden observar durante los meses de noviembre a marzo, siendo de mayor intensidad en enero.

Las estaciones muestran una fluctuación térmica mensual en la temperatura máxima, teniendo un promedio anual máximo de 25.0°C. El pico de temperatura máxima ocurre en febrero con 29.9°C, mientras que el valor mínimo de temperatura se manifiesta en julio con 18.6°C.

En lo que respecta a las temperaturas mínimas, estas se registran en la parte alta de la cuenca del río Rímac, en particular en las zonas de Matucana 10°C, Milloc y Mina Colqui 9.5°C y en la cuenca del Mantaro en la estación de Marcapomacocha se presenta el valor mínimo de -1.6°C (ANA 2010).

Por su parte el SENAMHI (2009), citado por el observatorio del agua Observatorio del Agua Chillón Rímac Lurín (2019) menciona que la temperatura es una variable vinculada estrechamente con las características altitudinales y la variación estacional.

Por lo general, las zonas de cuencas bajas poseen de un clima más cálido, con temperaturas que oscilan entre los 24°C y los 28°C. En las cuencas intermedias, las temperaturas suelen fluctuar entre los 16°C y los 22°C, mientras que en las cuencas altas encontramos el clima más fresco, incluso con la presencia de nevados, y las temperaturas máximas varían entre 8°C y 16°C., tal como se muestra en la Figura 10 de temperaturas máximas.

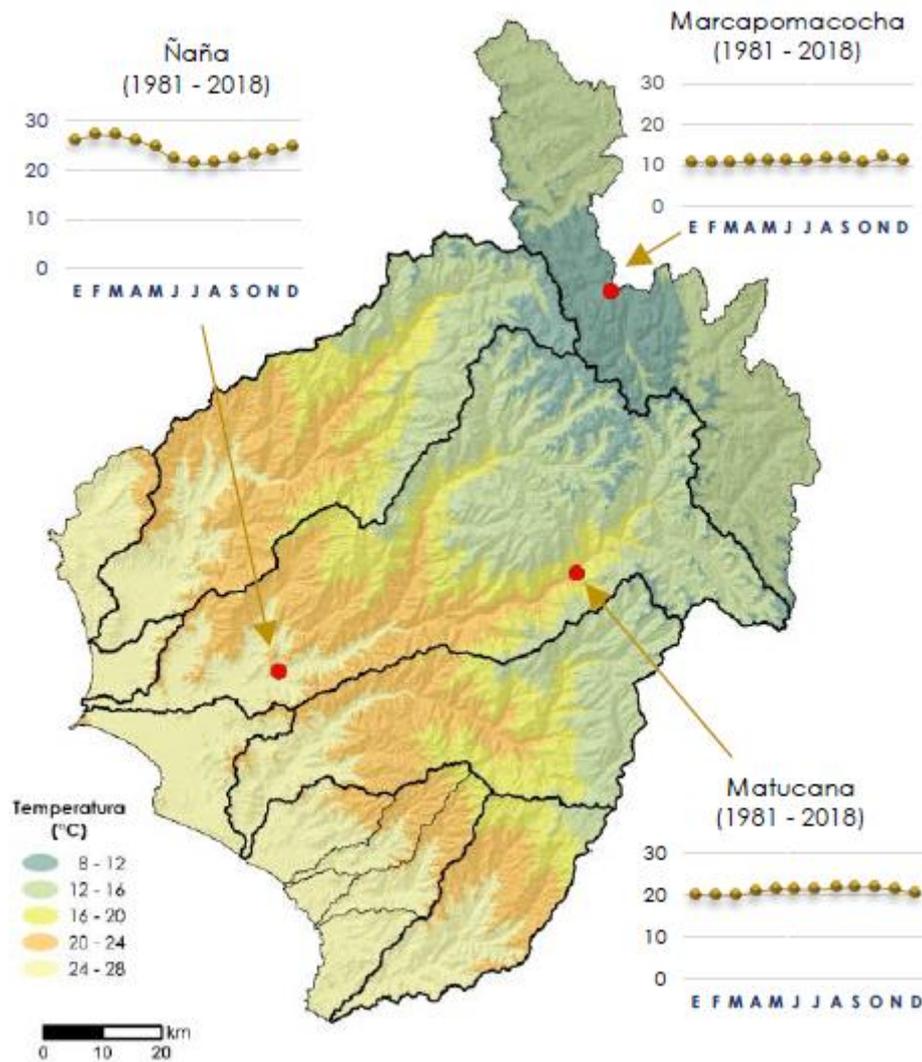


Figura 10. Temperaturas máximas en las cuencas del CHIRILU

Fuente: Observatorio del Agua Chillón Rímac Lurín (2019)

En la figura 10 se puede observar que para la Subcuenca Santa Eulalia las temperaturas máximas varían desde los 24-28°C en la parte más baja hasta los 8-12° C en la cuenca alta.

En cuanto a la temperatura mínima, para el área de estudio, en la parte más baja de la cuenca se tiene temperaturas de 8-12° C llegando hasta los -8°C en la parte alta, tal como se muestra en la siguiente Figura 11.

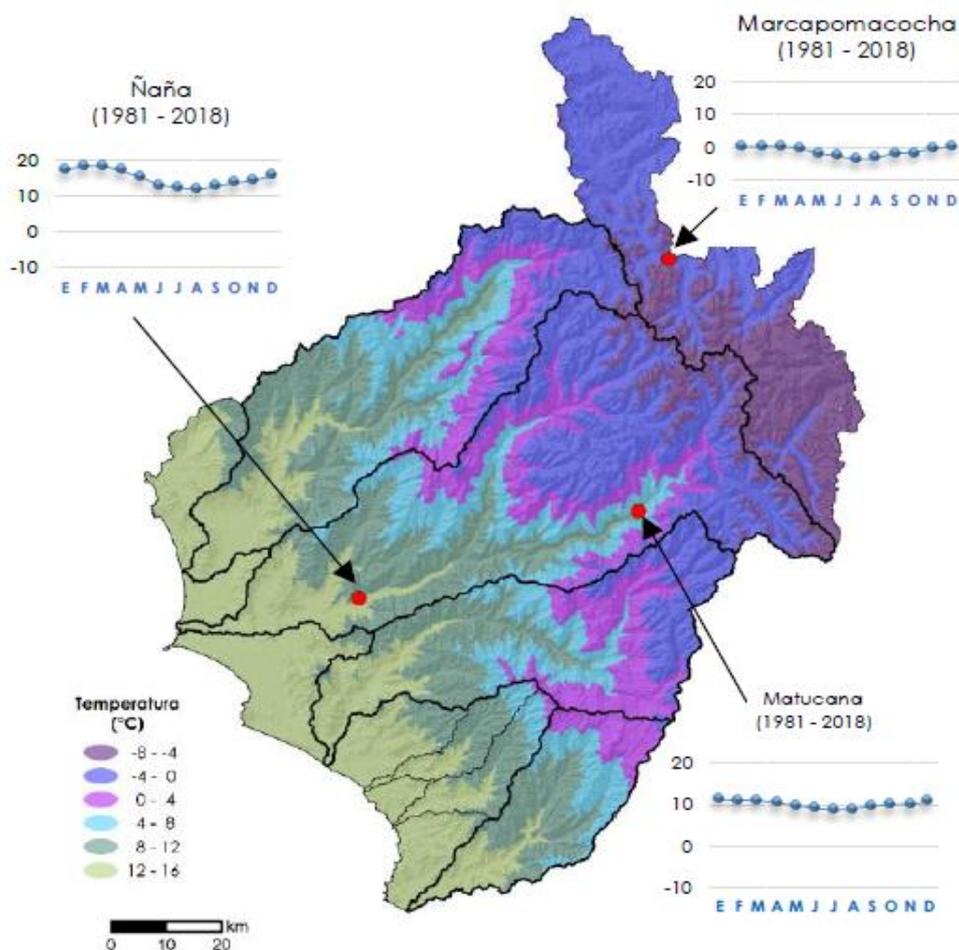


Figura 11. Temperaturas mínimas en las cuencas del CHIRILU

Fuente: Observatorio del Agua Chillón Rímac Lurín (2019)

3.1.7 Cobertura vegetal

La cobertura vegetal está conformada por gramíneas de tipo forrajero. En el rango altitudinal entre 0-1000 msnm, las áreas son áridas con especies de tillansias, las áreas en el rango de altitud de los 1000-2000 msnm, son consideradas zonas semiáridas y se caracterizan por tener especies como el molle (*Schinus molle*), la tara (*Caesalpinia tinctoria*) y una gran variedad de cactus. En el rango de 2000-4000 msnm se observa algunos arbustos y vegetación de pastos

naturales estacionales; entre los 4000-5000 msnm los pastos naturales son permanentes (ANA 2010).

Según el mapa nacional de cobertura vegetal (2015) en la subcuenca Santa Eulalia encontramos las siguientes coberturas: Desierto costero, cardonal, agricultura costera y andina, matorral arbustivo, pajonal andino, áreas altoandinas con escasa vegetación, bofedales y bosques relictos altoandinos, tal como se puede apreciar en el mapa siguiente.

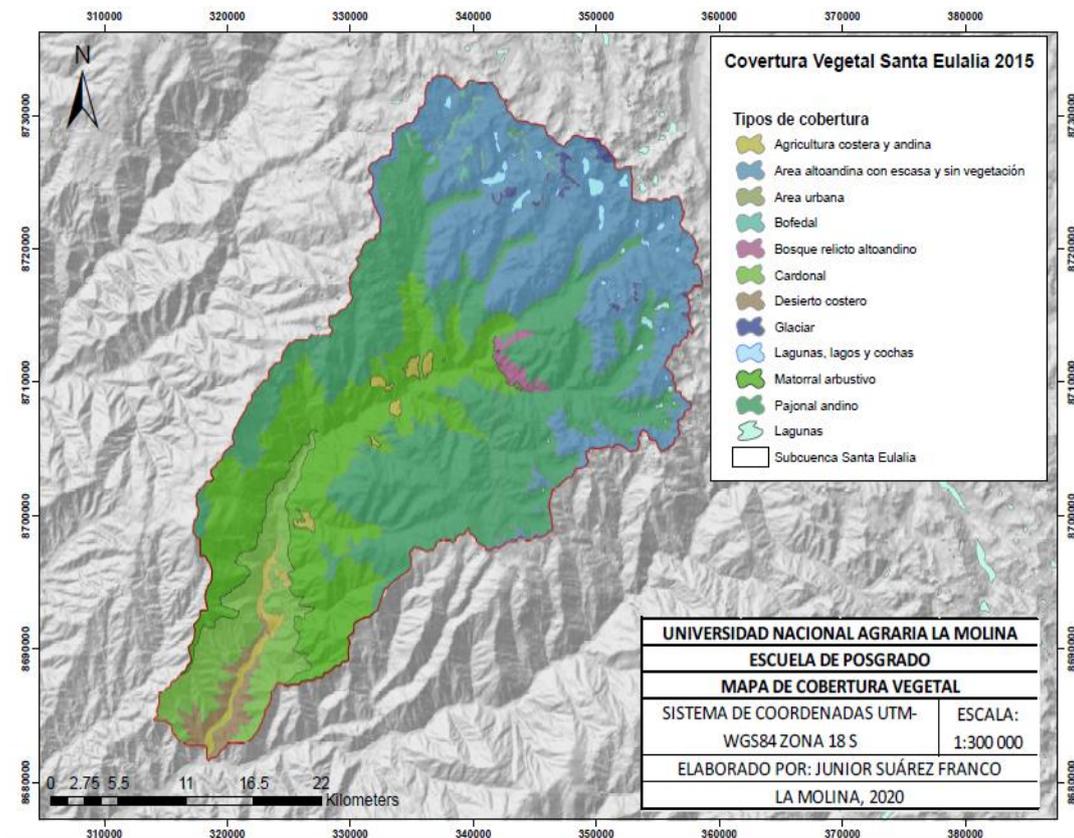


Figura 12. Mapa de Cobertura Vegetal

Fuente: Elaboración propia adaptada del mapa de cobertura vegetal nacional, MINAM, (2015)

Región Andina

Cardonal (Car)

Este tipo de cobertura vegetal se extiende desde los 1500 hasta los 2700 msnm, limitando en su parte inferior con el desierto costero y en su parte superior por el matorral arbustivo.

Este conjunto de vegetación se ve afectado por las condiciones de aridez, se pueden encontrar gran variedad de suculentas pertenecientes a la familia Cactaceae, las cuales se distribuyen de manera dispersa sobre las laderas colinosas y montañosas.

Matorral arbustivo (Ma)

Se encuentra distribuido ampliamente en la región andina desde los 1500 a los 3800 msnm hasta el límite con los pajonales.

En esta formación vegetal podemos encontrar tres subtipos de matorral, los cuales están influenciados en gran medida por las condiciones climáticas, los cuales se describen a continuación:

El subtipo matorral del piso inferior, es influenciado por la humedad del suelo, pudiendo ser árido o semiárido y se ubica aproximadamente a partir de 1500 msnm.

En el subtipo matorral ubicado en el piso medio y alto que va desde los 2500-3800 msnm, la vegetación está conformada por especies arbustivas tanto de naturaleza caducifolia como de perennifolia, mostrando una diversidad florística superior al subtipo descrito anteriormente. Algunas de las especies más prevalentes son: *Dodonea viscosa* (“chamana”), *Kageneckia lenceolata* (“Lloque”), *Mutisia acuminata* (“chinchilcuma”), *Barnadesia dombeyana* (“yauli”), *Agave americana* (“maguey azul”), *Tecoma sambucifolia* (“huaranhuay”), *OPHryosporus peruvianus* (“arenilla”), *Ambrosia arborescens* (“marco”), *Grindelia sp.*, *Heliotropium sp.*, *Spartium junceum* (“retama”), *Senecio sp.*, *Bidens sp.*, *Aristeguietia sp.*, etc; entre las cactáceas más frecuentes se encuentran *Opuntia subulata* “anjokishka”, etc. Se

incluyen en este piso algunas especies arbóreas de porte bajo y de manera dispersa, tales como: *Acacia macracantha* (“faique”), *Schinus molle* (“molle”) y *Caesalpineia spinosa* (“tara”).

Pajonal andino (Pj)

Se encuentra conformado principalmente por herbazales y podemos encontrarlo en la parte superior de la cordillera de los andes, entre 3800 y 4800 msnm. Crece sobre terrenos casi sin pendiente hasta áreas empinadas o escarpadas, en las depresiones y fondo de valles glaciares.

Bofedal (Bo)

También conocido como “oconal” o “turbera”, que significa mojado, representa un ecosistema hidromórfico presente en la región altoandina, a partir de los 3800 msnm.

Este humedal altoandino se sitúa en los fondos de valle fluvio-glacial, conos volcánicos, planicies lacustres, piedemonte y terrazas fluviales. Su fuente de agua proveniente del deshielo de los glaciares, del afloramiento de agua subterránea (puquial) y de las lluvias.

Su importancia ecológica radica en que tiene la capacidad de almacenar naturalmente el agua, actuando como filtros naturales que mejoran la calidad del agua. Además, representan una fuente significativa de alimento para la actividad ganadera en las altas montañas, cuyo enfoque principal son los camelidos sudamericanos y las ovejas.

Este ecosistema ha venido sufriendo el impacto de las acciones humanas, tales como: el pastoreo excesivo (lo que conlleva a la degradación de la calidad del forraje), la realización de trabajos de drenaje para el fomento de actividades productivas, construcción de reservorios de agua, construcción de presas, extracción para leña, y otras.

Bosque relictivo altoandino (Br-al)

Este bosque se distribuye en pequeños manchales en la zona altoandina del país, situado en terrenos montañosos con pendientes empinadas hasta escarpadas, casi inaccesibles y en ocasiones formando parte de la vegetación ribereña de ciertos ríos y quebradas, aproximadamente entre 3500 y 4900 msnm.

Este bosque considerado como “relictivo” debido a su baja representatividad (reducida superficie), alta fragmentación y poca accesibilidad, está representado por el género *Polylepis* conocido localmente como “queñoal”, “Quinual” o “quenual”, el cual está conformado en nuestro país por más de 19 especies, como por ejemplo, *Polylepis canoi*, *P. flavipila*, *P. incana*, *P. incarum*, *P. lanata*, *P. microphylla*, *P. multijuga*, *P. pauta*, *P. pepeí*, *P. racemosa*, *P. reticulata*, *P. rugulosa*, *P. seríceá*, *P. subsericans*, *P. subtusalbida*, *P. tarapacana*, *P. tomentella*, *P. triacontandra* y *P. weberbaueri*.(Mendoza & Cano 2011).

Podemos encontrar al género *Polylepis* asociado con *Gynoxis* sp. (“cotoquisuar”), *Escallonia* resinosa (“Chachacomo”) y *Escallonia* mirtilloides (“tasta”)

Unidades antrópicas de cobertura vegetal

Agricultura costera y andina (AGRI)

Esta cobertura hace referencia a todas las zonas donde se lleva a cabo la actividad agropecuaria, que se encuentran activas o en descanso. Se encuentran en todos los valles que atraviesan al extenso desierto costero y los que ascienden a la vertiente occidental andina llegando hasta la frontera con el pajonal altoandino.

Abarcan zonas de cultivos anuales o permanentes, bajo riego y en secano. Este tipo de cobertura incluye la flora ribereña que se extienden como estrechas y discontinuas franjas a lo largo de los cauces de los ríos y quebradas, tal como se observa en la zona costera y las partes bajas del ande donde es común encontrar especies como *Salix humboldtiana* “sauce”, *Acacia macracantha* “huarango” y *Shinus molle* “molle”.

3.1.8 Suelos

El INADE (1997) realizó un estudio de suelos que comprende la cuenca del río Rímac, dentro del cual se encuentra la subcuenca del río Santa Eulalia. Los suelos que se identificaron en dicho estudio fueron clasificados y descritos taxonómicamente a nivel categórico de “Gran grupo de suelos”, cuales se describen a continuación.

Consociaciones

Suelo Rímac (Torrifluvents)

Estos suelos se forman a partir de materiales fluviales de textura media a moderadamente gruesa, con presencia de fragmentos rocosos redondeados y/o subangulares que algunas veces limitan la profundidad efectiva del suelo. En cuanto al relieve, varía desde áreas planas a ligeramente inclinadas. Presentan un drenaje interno bueno a moderado.

Sus propiedades químicas se manifiestan a través de una respuesta neutra a ligeramente alcalina (pH 6.5 - 7.7); con una saturación elevada de bases donde predominan los cationes básicos. Estas condiciones sumadas a los contenidos medios de materia orgánica y nitrógeno, bajos de fósforo y alto de potasio disponibles, determinan que la fertilidad natural de la capa arable sea media.

Este tipo de suelo presenta pendientes planas, ligeramente inclinada y fuertemente inclinada.

Suelo Anden (Haplustolls)

Se forman a partir de componentes coluvio-aluviales ubicadas en laderas montañosas de calizas, margas, dolomitas y lutitas. Son profundos, con una textura que varía de media a moderadamente fina, y contienen fragmentos rocosos de diferentes tamaños. Presentan un drenaje interno moderado a excesivo.

En cuanto a sus propiedades químicas muestran una reacción que varía de neutra a moderadamente alcalina (pH 6.6 - 8.4); presentan buena saturación de bases. Estas condiciones junto con los niveles medios de materia orgánica y nitrógeno, fósforo y potasio disponibles, hacen que la fertilidad natural de la capa arable sea media.

Este tipo de suelo presenta pendientes fuertemente inclinada, moderadamente empinada y empinada.

Misceláneo Roca (R)

Está conformada por materiales rocosos o afloramientos líticos, son áreas con abundante pedregosidad superficial y se caracterizan por ser suelos esqueléticos muy superficiales, que no presentan ninguna aptitud de uso con fines agrícolas, pecuarios o forestales, limitando su uso a zonas para recreación, protección de hábitat de fauna silvestre, que constituyen las tierras de protección (X).

En este tipo de suelo se encuentra pendientes moderadamente empinada, empinada, muy empinada y extremadamente empinada.

Suelo Viso (Ustortents)

Son suelos originados a partir de materiales coluvio – aluviales, presentan una textura moderadamente gruesa a media, la profundidad puede ser superficial hasta moderadamente profunda. Tienen un drenaje interno bueno a excesivo. En áreas con pendientes mayores de 25 por ciento presenta erosión reciente.

Las propiedades químicas de estas se manifiestan a través de una reacción que va de neutra a ligeramente ácida (pH 6.1 - 7.3), con una saturación de bases moderada. Esstos factores, junto con los niveles medios de materia orgánica y nitrógeno, los bajos niveles de fósforo y los niveles medios de potasio disponibles, indican que la fertilidad natural de la capa cultivable es de media a baja. Este tipo de suelo presenta pendientes fuertemente empinada a moderadamente inclinada

Misceláneo Cárcavas (Cv)

Se compone principalmente por la unidad no edáfica Cárcava. Se localiza en la parte media a baja de la cuenca. Esta unidad no edáfica está conformada por áreas, donde la erosión hídrica ha eliminado el suelo, formando una red de zanjas en forma de "V", con una profundidad mayor de 0.50 m, por donde son arrastrados los sedimentos finos de la capa superficial del suelo, como arcillas, limos y arenas.

Por lo general, no tiene aptitud de uso con fines agrícolas, pecuarios o forestales estando relegada como Tierras de protección; pero si podrían ser forestados con especies nativas, pero sólo con fines de protección de cuenca. La pendiente en este tipo de suelo es empinado y muy empinado.

Misceláneo Nival

Esta unidad se compone principalmente de elementos rocosos o afloramientos líticos cubiertos generalmente por nieve. Los nevados están incluidos dentro de esta categoría. Son áreas caracterizadas por su abundante pedregosidad superficial y por suelos esqueléticos muy superficiales, sin ninguna capacidad de uso para fines agrícolas, pecuarios o forestales. En cambio, estas tierras están reservadas para otros propósitos, como áreas de recreación, por lo que entre otros constituyen las tierras de protección (X).

Asociaciones

Asociación Anden – Viso (An – Vi)

Esta asociación presenta pendientes moderadamente empinadas a empinadas, con las características edáficas descritas anteriormente.

Misceláneo Roca – Paye (R – Pa)

Presentes en su mayoría en zonas bajas de la cuenca, en un entorno de laderas de montañas en un rango de pendientes de 8 - 50 %. Esta asociación presenta las siguientes pendientes: fuertemente inclinada, moderadamente empinada, empinada y muy empinada.

Las características del Misceláneo Roca ya fueron explicadas anteriormente, mientras que el suelo Paye es originado a partir de materiales coluvio – aluviales, de textura media a moderadamente fina, mayormente con presencia de fragmentos rocosos irregulares de naturaleza variada; moderadamente profundo a superficiales. Presentan un drenaje interno bueno.

Sus propiedades químicas oscilan entre neutro a ligeramente alcalino (pH 6.9 - 7.5); con moderada saturación de bases, con predominancia de cationes básicos. Estas condiciones juntamente con los contenidos: medio de materia orgánica y nitrógeno, bajos de fósforo y medio de potasio disponibles, determinan que la fertilidad natural de la capa arable sea media a baja.

Misceláneo Roca – Viso (R – Vi)

Se distribuyen mayormente en la parte media de la cuenca, dentro de una fisiografía de laderas de montañas en un rango de pendientes de 15 - 50 %. Esta asociación presenta las siguientes pendientes: Fuertemente empinada, empinada, muy empinada.

Misceláneo Roca – Pastizal (R – Ps)

Se ubican generalmente en la parte alta de la cuenca, dentro de una fisiografía de laderas de montañas en un rango de pendientes de 15 - 50 %. Presenta las siguientes pendientes: ligeramente inclinada, moderadamente inclinada, fuertemente inclinada, moderadamente empinada y empinada.

Misceláneo Roca – Campamento (R – Cm)

Están distribuidas mayormente en la parte alta de la cuenca, dentro de una fisiografía de laderas de montañas en un rango de pendientes de 15 - 50 %. Esta asociación presente las siguientes pendientes: moderadamente empinada, empinada.

El suelo campamento se origina por material coluvio - aluviales y fluvio glacial, ubicados en laderas y cimas de montaña de areniscas, tobas y depósitos fluvio glaciales, con textura moderadamente gruesa a media, presentan un drenaje interno bueno a algo excesivo. Sus características químicas varían de moderadamente ácida a ligeramente alcalina (pH 5.3 - 7.2); presentan moderada saturación de bases. Estas condiciones, sumadas a los contenidos: medio de materia orgánica y nitrógeno, bajos de fósforo y bajo de potasio disponibles, determinan que la fertilidad natural de la capa arable sea baja.

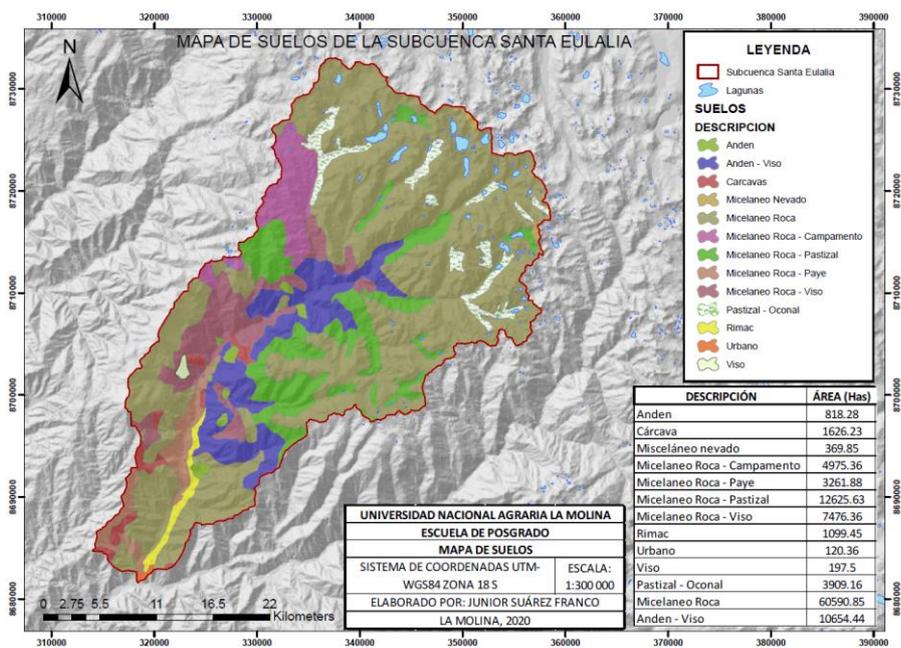


Figura 13. Mapa de suelos

Fuente: Elaboración propia adapta del mapa de Suelos de la cuenca del río Rímac, INADE (1997)

Tabla 4. Superficie cubierta por tipo de suelo en la subcuenca Santa Eulalia

DESCRIPCIÓN	ÁREA (Has)	PORCENTAJE (%)
Anden	818.28	0.76
Cárcava	1626.23	1.51
Misceláneo nevado	369.85	0.34
Misceláneo Roca - Campamento	4975.36	4.62
Misceláneo Roca - Paye	3261.88	3.03
Misceláneo Roca - Pastizal	12625.63	11.72
Misceláneo Roca - Viso	7476.36	6.94
Rímac	1099.45	1.02
Urbano	120.36	0.11
Viso	197.5	0.18
Pastizal - Oconal	3909.16	3.63
Misceláneo Roca	60590.85	56.25
Anden - Viso	10654.44	9.89
TOTAL	107725.35	100.00

Fuente: Elaborado a partir del mapa de suelos del INADE (1997)

3.2. METODOLOGÍA

Para la presente investigación se utilizaron los siguientes materiales y equipos:

3.2.1. Materiales

Información de la zona de estudio: precipitación (mm/año), altitud (msnm), temperatura (°C), suelos (textura y pH), imágenes satelitales Sentinel 2.

- La información correspondiente a la precipitación y temperatura fue obtenida de la base de datos PISCO generada por SENAMHI y se tomó un periodo de 25 años desde 1990 a 2015, en total fueron 15 estaciones meteorológicas las cuales se encuentran

dentro y fuera la subcuenca Santa Eulalia y estas son: Arahua, Autisha, Canchacalla, Carampoma, Casapalca, Chosica, Lachaqui, Matucana, Milloc, Pariacancha, Rio Blanco, San José de Parac, Santiago de Tuna, Santa Eulalia y Sheque.

El resultado obtenido fue comparado con la precipitación obtenida por el estudio realizado por Manco y Paucar (2015) la cual fue recopilada y tratada por los mencionados autores, esta información corresponde a doce estaciones meteorológicas que están dentro y alrededor de la cuenca en estudio.

- Muestras de suelo colectadas y recopiladas de estudios en la zona para la obtención de la capa de pH del suelo de la cuenca.
- Capa de textura del suelo se obtuvo de la plataforma global *Soilgrids* con un tamaño de píxel de 250 m, resampleado a 10 m e información obtenida por el estudio realizado por el INADE (1997) en el “Plan de manejo y estudios de factibilidad del programa ambiental de la cuenca del río Rímac”
- Modelo de elevación digital (DEM-ALOS PALSAR) para el área de estudio, obtenido de la plataforma *Alaska Satellite Facility* el cual posee un tamaño de píxel de 12.5 m, al cual, usando la técnica de resampleo se ajustó el tamaño del píxel a 10 m, a partir del cual se generó la capa de altitud. Estos procesos se realizaron utilizando el *software Arcgis 10.3*. se utilizó esta misma información para generar la capa de pendientes del área de trabajo.
- Mapa de cobertura vegetal nacional, obtenido del MINAM a una escala 1:100 000
- Finalmente, las imágenes satelitales fueron descargadas de la página de la USGS, correspondiendo estas imágenes al mes de julio del 2020. Se trabajó con las bandas 2,3,4 y 8, correspondientes al rojo, azul, verde e infrarrojo cercano con una resolución espacial de 10 metros.

3.2.2. Equipos

- *Software Arcgis 10.3*
- *Software Erdas Imagine 2014*
- *Software R studio*
- *Software Office 2010*
- *GPS Garmín eTrex*
- Phmetro digital EXTECH
- Conductímetro digital EXTECH
- Agua destilada
- Cámara fotográfica
- Laptop procesador Intel core i5

3.2.3. Metodología

El presente trabajo se realizó en tres etapas, las cuales se describen a continuación:

Primera etapa – recopilación de información

En esta etapa se realizó la búsqueda y recopilación de información secundaria, en la cual se obtuvo la data de precipitación, altitud, temperatura, suelos (textura) y las imágenes satelitales Sentinel 2.

Asimismo, se hizo una revisión de las especies forestales arbóreas y arbustivas que se podrían encontrar dentro de la subcuenca en base a la cobertura vegetal y otros estudios. Para dichas

especies se realizó la búsqueda de los requerimientos de precipitación, suelos, temperatura, altitud y pendiente en los que prosperan mejor. Dicha búsqueda consistió en revisiones de tesis y artículos científicos. Así mismo, se realizó una encuesta a profesionales especialistas de diversas entidades del país que viene trabajando muchos años con estas especies forestales.

Esta información se sistematizó en una tabla de requerimientos y se usó para generar los mapas de las áreas aptas y no aptas para cada variable.

A continuación, se muestra en la siguiente figura los requerimientos ambientales de las especies:

REQUERIMIENTOS/ESPECIES		Quinual (<i>Polylepis incana</i>)	Colle (<i>Buddleja coriacea</i>)	Lloque (<i>Kageneckia lanceolata</i>)	Chachacoma (<i>Escallonia myrtilloides L.f.</i>)
CLIMA	Precipitación (mm/año)	250 a 2000 Hoch y Korner (2005) 500 a 1500 Rhoner (2023) 400 a 1500 Cardoso & Zanabria (2023) 250 a 2000	450 a 1250 Nina (1999) 500 a 1200 Rhoner (2023) 500 a 1000 Cardoso & Zanabria (2023) 450 a 1250	300 a 1200 Rhoner (2023) 600 a 1200 Cardoso & Zanabria (2023) 500 a 2000 Mostacero (2005) 300 a 2000	500 a 1000 Romero & Ramos (2009). 500 a 700 Aragon & Chuspe (2018) 500 a 1500 Rhoner (2023) 500 a 1000 Cardoso & Zanabria (2023) 500 a 1500
	Rango de temperatura (mín - max) °C	-3 a 19 (Rhoner 2023) 4 a 25 (Cardoso & Zanabria 2023) -3 a 25	2 a 25 Basfor (2000) -3 a 19 Rhoner (2023) 5 a 20 Cardoso & Zanabria (2023) -3 a 25	8 a 16 Reynel (1990) 10 a 24 Mostacero (2005) 2 a 25 Rhoner (2023) 8 a 20 Cardoso & Zanabria (2023) 2 a 25	-1 a 20 Rhoner (2023) 5 a 25 Cardoso & Zanabria (2023) 1 a 25
SUELO	PH	6.1 a 6.5 Hoch y Korner (2005) 6 a 7.8 Rhoner (2023) 4 a 6 Cardoso & Zanabria (2023) 4 a 7.8	5 a 7.8 Rhoner (2023) 5 a 7 Cardoso & Zanabria (2023) 5 a 7.8	7.4 a 7.8 Rhoner (2023) 4 a 7 Cardoso & Zanabria (2023) 4 a 7.8	6 a 7.8 Rhoner (2023) 5 a 7 Cardoso & Zanabria (2023) 5 a 7.8
	Textura	Franco, Franco limoso, Limo Hoch y Korner (2005) Arenoso, Franco, Arcilloso Rhoner (2023) Franco arenoso Cardoso & Zanabria (2023)	Arcilloso, franco limoso, arenoso Franco arcilloso Rhoner (2023) Arcilloso, franco limoso Cardoso & Zanabria (2023)	Arcilloso, arenoso arcilloso, limo arcilloso, franco arenoso arcilloso, franco limo arcilloso Mostacero (2005) Franco arcilloso Rhoner (2023) Arcilloso, franco arenoso Cardoso & Zanabria (2023)	Franco arcilloso Rhoner (2023) Arcilloso, franco limoso Cardoso & Zanabria (2023)
TOPOGRAFIA	Altitud (msnm)	2000 a 5000 Reynel et al (2007) 2800 a 4400 Rhoner (2023) 2900 a 4500 Cardoso & Zanabria (2023) 2000 a 5000	2300 a 4500 Reynel (1988) 3000 a 4200 Rhoner (2023) 2500 a 4000 Cardoso & Zanabria (2023) 2300 a 4500	2000 a 4100 (MINAM, 2011; Tropicos, 2017) 2000 a 4000 Mostacero (2005) 2500 a 3500 Rhoner (2023) 2300 a 3600 Cardoso & Zanabria (2023) 2000 a 4100	2800 a 4200 Galiano et al., (2013) 1800 a 4000 Morales (2001) 3700 a 4000 Rhoner (2023) 1800 a 3800 Cardoso & Zanabria (2023) 1800 a 4200
	Pendiente (%)	>75 Rhoner (2023) 30 a 45 Cardoso & Zanabria (2023)	60 a 75 Rhoner (2023) 30 a 45 Cardoso & Zanabria (2023)	60 a 75 (Rhoner 2023) 15 a 30 Cardoso & Zanabria (2023)	> 75 (Rhoner 2023) 30 a 45 Cardoso & Zanabria (2023)

Figura 14. Requerimientos ambientales de las especies

Fuente: Elaboración propia

Se realizó 3 salidas al campo para conocer el área de estudio y coleccionar muestras de suelo para su análisis. La primera salida correspondió al tramo central de la subcuenca, comenzando desde la parte baja entrando por la localidad de Santa Eulalia a 900 msnm y terminando en la parte más alta de la cuenca límite con el poblado de Marcapomacocha a 4680 msnm. En la segunda salida se recorrió la margen izquierda de la subcuenca ingresando también por la localidad de Santa Eulalia hasta la represa Sheque a 3160 msnm y tomando el desvío que

conduce a la localidad de Huanza, se llegó hasta el centro poblado de Acobamba a 4240 msnm. Finalmente, la tercera salida fue hacia la margen derecha de la subcuenca llegando a las alturas de la localidad de San Pedro de Casta hasta los 4195 msnm. A lo largo de estos recorridos se obtuvieron las muestras de suelo y datos para validar información secundaria como la cobertura del suelo.

Segunda etapa – procesamiento de la información

- La información correspondiente a la precipitación, temperatura (máxima y mínima), fue ordenada y procesada utilizando el software *R studio*. Con la ayuda del mismo programa se realizó la interpolación utilizando 2 métodos diferentes (kriging ordinario e IDW) de los cuales se eligió el que tenía mayor coeficiente de correlación que se muestra más adelante. Las muestras de suelo fueron analizadas por el laboratorio de suelos de la Universidad Nacional Agraria la Molina y una vez obtenidos los resultados se siguió el mismo procedimiento. De esta forma se obtuvieron las capas de precipitación, temperatura máxima y mínima y pH del suelo en formato raster con un tamaño de pixel de 10 m.
- Para seleccionar el método para precipitación y temperatura más adecuado de interpolación se colocó los puntos de las estaciones meteorológicas y se realizó una extracción de datos del raster, utilizando la herramienta “*Extract multi values to points*”, las cuales se correlacionaron con la data propia de las estaciones y se eligió la que mayor coeficiente de correlación tuvo.
- Se realizó el mismo proceso que en el caso anterior para elegir el método más adecuado de interpolación para el pH del suelo, pero esta vez los puntos de donde se extrajo la data no fueron de las estaciones, sino los puntos de muestreo de suelos.
- La información correspondiente a la textura del suelo fue procesada usando el *software Arcgis* y se obtuvo la capa de textura para la subcuenca en formato *raster* con un tamaño de pixel de 10 m.

- El DEM-ALOS PALSAR sirvió para generar la capa de pendientes (%) y de altitud (msnm), ambos también en formato raster con un tamaño de pixel de 10 m.
- Para generar la capa de cobertura del suelo de la subcuenca Santa Eulalia se utilizó el mapa de cobertura vegetal elaborado por el MINAM utilizando la metodología *Corine Land Cover* y se realizó una adaptación agregando zonas de cultivo, bofedales y áreas urbanas, utilizando la imagen sentinel para corroborar la presencia. Una vez obtenido el resultado en formato *shapefile* se convirtió a formato *raster* utilizando la herramienta *Raster to Polygon* del *ArctoolBox* del Arcgis.
- La imagen satelital Sentinel 2 A, fue descargada tomando en cuenta la fecha más actual y la calidad (porcentaje de nubosidad). Esta imagen correspondiente a julio del 2020 una vez descargada se procedió a unir las bandas 2,3,4 y 8 usando la herramienta “*layer stack*” del programa *Erdas Imagine*, para el área de estudio se necesitaron dos imágenes las cuales fueron unidas formando un mosaico con la herramienta “*Mosaic pro*”

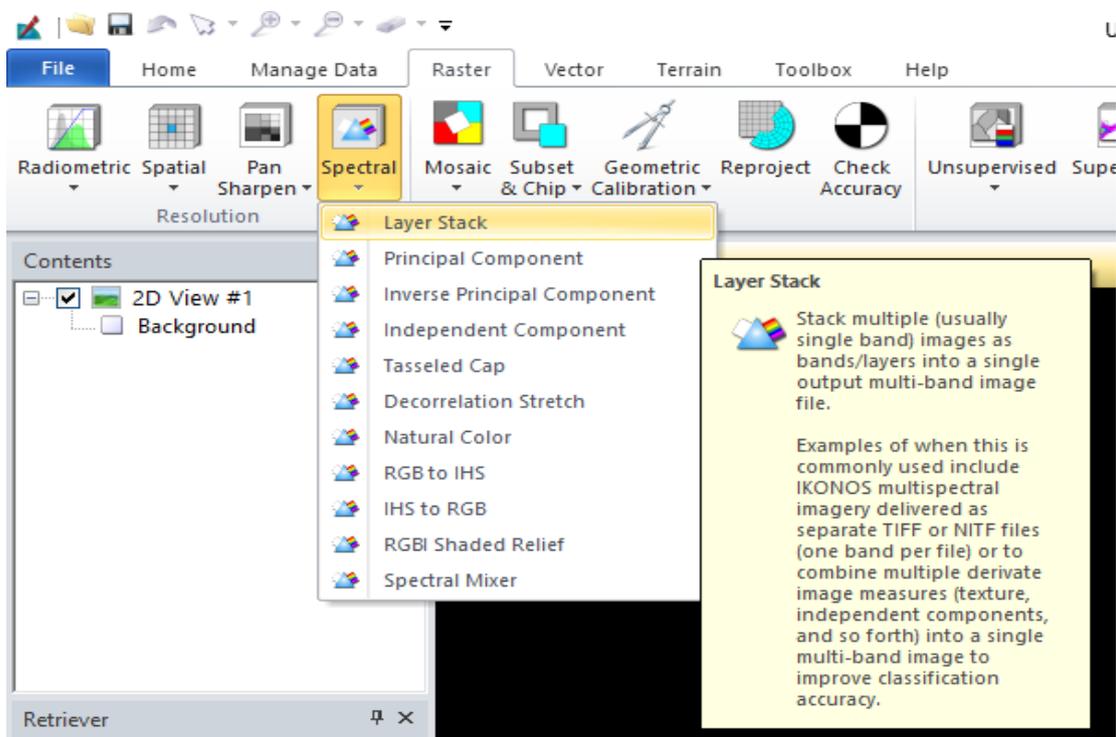


Figura 15. Herramienta “Layer Stack” para unión de bandas espectrales

Fuente: Software ERDAS IMAGINE

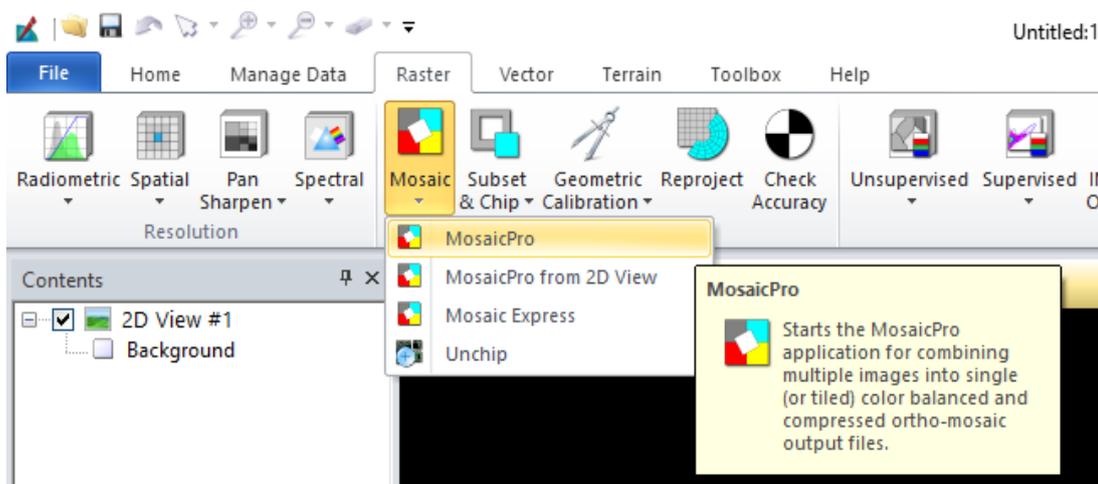


Figura 16. Herramienta “MosaicPro” para unión de escenas de imágenes

Fuente: Software ERDAS IMAGINE

Para establecer la leyenda de la cobertura de la tierra se utilizó la metodología *Corine Land Cover* haciendo las equivalencias respectivas con la leyenda utilizada por el MINAM. Además, se utilizó imágenes de mayor resolución espacial como google earth para la verificación de las coberturas a mayor detalle. A continuación, se muestra la figura de equivalencias de las coberturas.

COBERTURA VEGETAL	CORINE LAND COVER
Areas industriales e infraestructura	Areas industriales e infraestructura
Agricultura costera y andina	Areas agricolas heterogeneas
Areas altoandina con escasa y sin vegetacion	Herbazal
Areas altoandina con escasa y sin vegetacion	Tierras desnudas
Area urbana	Areas urbanizadas
Bofedal	Areas Humedas Continentales
Bosque relicto altoandino	Bosque denso bajo
Cardonal	Vegetacion arbustiva/herbacea
Desierto costero	Areas arenosas naturales
Glaciar	Glaciares
Lagunas, lagos y cochas	Lagos y lagunas
Matorral arbustivo	Areas con vegetacion herbacea y/o arbustiva

Figura 17. Equivalencias de la cobertura vegetal con la leyenda de *Corine Land Cover*

Fuente: Elaboración propia

- Una vez obtenidas las capas *raster* de las variables mencionadas se procedió a realizar una primera reclasificación, utilizando la herramienta *reclassfy* del Arcgis. Esta reclasificación consistió en dividir las variables en rangos de precipitación, temperatura máxima y mínima, pH del suelo, pendiente y altitud.
- Posteriormente se realizó una segunda reclasificación con la misma herramienta, ésta vez la clasificación consistió en realizar una asignación de valores de 0 y 1. El valor 0 correspondió a los rangos, de los valores que se reclasificaron inicialmente, que no eran óptimos según los requerimientos de las especies. En tanto el valor 1 correspondió a los rangos que sí eran óptimos. Esta valoración de 0 y 1 sirvió para que posteriormente el software arroje un resultado de zonas que no son óptimas y zonas que sí lo son.

La reclasificación se puede apreciar en la figura 18.

VARIABLES/ESPECIES		RANGOS	QUINUAL	COLLE	LLOQUE	CHACHACOMO	
C L I M A	P R E C I P I T A C I O N (mm/año)	0-249	0	0	0	0	
		250-299	1	0	0	0	
		300-449	1	0	1	0	
		450-499	1	1	1	0	
		500-1000	1	1	1	1	
	T. M I N I M A (°C)	0.84 - 2	1	1	0	1	
		2 - 6	1	1	1	1	
		6 - 10	1	1	1	1	
		10 - 14	1	1	1	1	
		14 - 16	1	1	1	1	
	T. M A X I M A (°C)	12 - 16	1	1	1	1	
		16 - 20	1	1	1	1	
		20 - 24	1	1	1	1	
	S U E L O	P H	4 - 4.49	1	0	1	0
			4.5 - 4.99	1	0	1	0
5 - 5.99			1	1	1	1	
6 - 7.8			1	1	1	1	
T E X T U R A		ARE	1	1	0	0	
		FLAR	0	0	1	0	
		FARE	1	0	1	0	
		F	1	0	0	0	
		FAR	0	1	1	1	
		FARARE	0	0	1	0	
T O P O G R A F I A	P E N D I E N T E (%)	0 - 15	0	0	0	0	
		15 - 25	0	0	1	0	
		25 - 50	1	1	1	1	
		50 - 75	0	1	1	0	
		>75	1	0	0	1	
	A L T I T U D (msnm)	1000 - 1800	0	0	0	0	
		1800 - 2000	0	0	0	1	
		2000 - 2300	1	0	1	1	
		2300 - 3000	1	1	1	1	
		3000 - 3800	1	1	1	1	
		3800 - 4100	1	1	1	1	
		4100 - 4200	1	1	0	1	
		4200 - 5000	1	1	0	0	
5000 - 5200	0	0	0	0			

Arenoso
Franco limoso arcilloso
Franco arenoso
Franco
Franco arcilloso
Franco arcilloso arenoso

Figura 18. Valoración de acuerdo con los rangos

Fuente: Elaboración propia

- Se realizó la misma valoración para la cobertura de la tierra, resultando de la siguiente manera:

EVALUACION MULTICRITERIO	
Cobertura de la tierra	Valor
Arbustal	1
Areas humedas continentales	0
Bosque denso bajo	0
Glaciares	0
Herbazal	1
Lagos y lagunas	0
Tierras desnudas	1
Vegetacion arbustiva/herbacea	1
Areas agricolas heterogeneas	0
Areas arenosas naturales	0
Areas con vegetacion herbacea y/o Arbustiva	1
Areas industriales e infraestructura	0
Areas urbanizadas	0

Figura 19. Valoración de la cobertura de la tierra

Fuente: Elaboración propia

- Con la clasificación mostrada en las tablas anteriores, se realizó el modelamiento utilizando la herramienta “*Fuzzy Overlay*” del Arcgis. La cual arrojó como resultado un mapa con las áreas óptimas de las cuatro especies indicadas.

La secuencia se puede visualizar en la siguiente figura 20.

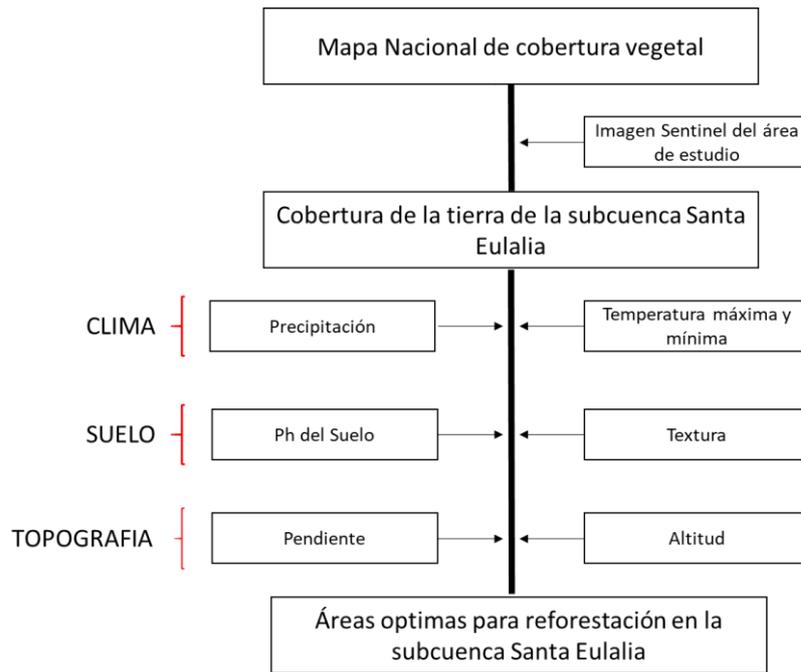


Figura 20. Procedimiento para la zonificación de áreas óptimas

Fuente: Elaboración propia

Tercera etapa – validación de la información

En esta etapa se realizó otra a campo para validar los resultados obtenidos.

Para determinar el número de muestras a validar se utilizó las muestras de pH recogidas (Anexo) y analizadas anteriormente y se calcularon el promedio y la desviación estándar para calcular el coeficiente de variabilidad que se utilizó en la siguiente Ecuación 1:

$$n = \frac{t^2 * CV^2}{\xi^2}$$

Donde:

n = número de muestras

t = Muestra de la distribución t para un nivel de 95% de confianza, se utiliza 2.

CV = Coeficiente de variación

ε = Error permitido (10%)

Para calcular el coeficiente de variación se utilizó la siguiente Ecuación 2: $CV = \frac{s}{\bar{X}} * 100$

Donde:

s = Desviación estándar

\bar{X} = Promedio

Reemplazando los valores obtenidos para el cálculo del coeficiente de variación tenemos:

$$CV = \frac{1.08}{6.09} * 100 \quad Cv=17.73\%$$

Ahora reemplazando en la ecuación 1:

$$n = \frac{2^2 * (17.73)^2}{10^2} = 12.5$$

Según la ecuación 1, el tamaño de muestra es de 13, pero se realizaron 21 para una mejor validación.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. RESULTADOS

4.1.1. Precipitación

Se obtuvo la precipitación anual en milímetros para las 15 estaciones que se muestran en la

Precipitación media mensual para el periodo de 1990 a 2015															
MES	ARAHUAY	AUTISHA	CANCHACA LLA	CARAMPO MA	CASAPALC A	CHOSICA	LACHAQUI	MATUCANA	MILLOC	PARIACAN CHA	RIO BLANCO	SAN JOSE DE PARAC	SANTIAGO DE TUNA	SANTA EULALIA	SHEQUE
1	51.30	36.85	57.20	84.71	114.63	5.21	93.80	57.95	162.00	118.00	96.24	111.57	45.20	6.92	78.93
2	84.80	60.96	83.47	92.00	108.62	8.37	126.00	72.98	151.44	117.00	113.13	118.80	81.00	10.98	93.30
3	89.60	57.57	90.99	98.81	109.77	6.39	150.00	82.89	154.53	138.00	114.67	125.16	82.80	7.34	103.34
4	21.30	12.00	16.67	36.73	48.67	2.36	56.60	26.53	68.20	55.10	40.92	45.16	22.20	0.90	34.73
5	0.84	0.45	0.67	5.92	17.71	0.18	6.25	1.18	23.40	15.20	7.83	9.98	1.26	0.22	6.72
6	0.00	0.00	0.00	0.33	6.57	0.00	0.02	0.15	7.28	3.36	1.78	2.31	0.00	0.01	1.48
7	0.00	0.00	0.00	0.16	5.73	0.02	0.00	0.00	7.68	2.00	0.95	1.30	0.24	0.00	0.58
8	0.31	0.02	0.01	0.93	11.63	0.02	0.51	0.35	17.69	5.10	4.03	4.49	0.09	0.00	2.31
9	1.05	1.10	0.76	7.10	23.95	0.08	5.58	1.05	40.88	22.90	12.30	15.16	0.65	0.07	6.79
10	5.55	3.33	6.42	24.41	55.01	0.12	23.20	8.98	72.88	58.50	31.72	41.65	3.28	0.28	21.27
11	11.20	6.25	8.67	32.76	55.19	0.34	37.50	16.12	88.68	60.00	46.54	52.67	9.71	0.58	30.65
12	30.50	19.47	37.41	70.51	100.22	1.30	70.80	44.74	146.18	104.00	89.38	102.90	31.30	3.32	61.77
TOTAL	296.45	197.99	302.28	454.35	657.69	24.40	570.26	312.92	940.84	699.16	559.49	631.16	277.73	30.62	441.90

Figura 21. Precipitación media mensual para el periodo de 1990 – 2015

Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar en la figura 21, los valores obtenidos son muy parecidos a los valores obtenidos por Manco y Paucar (2015), siendo el más cercano el de la estación de Matucana donde se tiene una precipitación anual promedio de 312,92 mm. Las estaciones donde se tiene una diferencia son Milloc y Pariacancha, con aproximadamente 50 mm más en los resultados obtenidos para la presente investigación, esto puede deberse a que en la investigación realizada por Manco y Paucar se toma un periodo de 20 años (1990-2010) y para este estudio se toma un periodo de 25 años (1990-2015). Esta información de precipitación es muy importante pues es uno de los factores determinantes para que las plantaciones forestales prosperen y con ello los servicios ecosistémicos que estos pueden brindar.

Además, se cumple la variación de la precipitación con respecto a la altitud, pues las estaciones ubicadas a mayor altitud presentan valores más altos de precipitación y viceversa.

Como se mencionó en la metodología se realizó la interpolación de los datos obtenidos para cada una de las estaciones meteorológicas utilizando dos métodos de interpolación (IDW y Kriging ordinario), tal como se muestran en las Figuras 22 y 23 respectivamente.

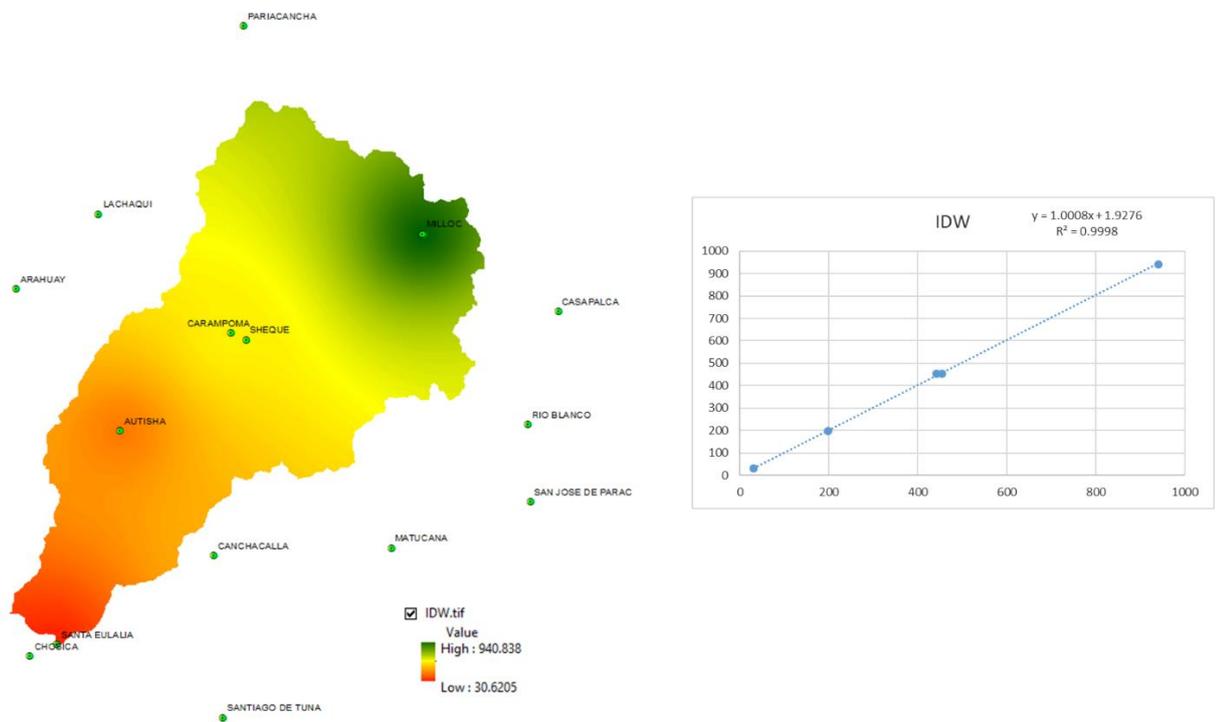


Figura 22. Interpolación utilizando IDW

Fuente: Elaboración propia

En la figura 23 se puede apreciar las 15 estaciones que se tomaron en cuenta para el presente estudio, de las cuales 4 se encuentran dentro de la subcuenca Santa Eulalia y las otras corresponden a cuencas vecinas del Chillón y Rímac (San Mateo). Este método de interpolación arroja un coeficiente correlación de (99,98%) y fue el elegido para realizar el modelamiento final.

Aquí también se puede evidenciar que la precipitación aumenta con la altitud, comenzado con 30 mm/año en la parte más baja del área en la localidad de Santa Eulalia a 900 msnm y llegando a 940 mm/año en la parte más alta cercana a los 5000 msnm.

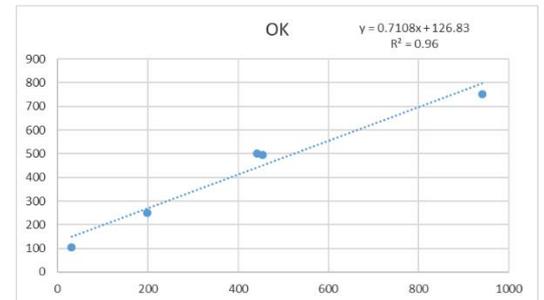
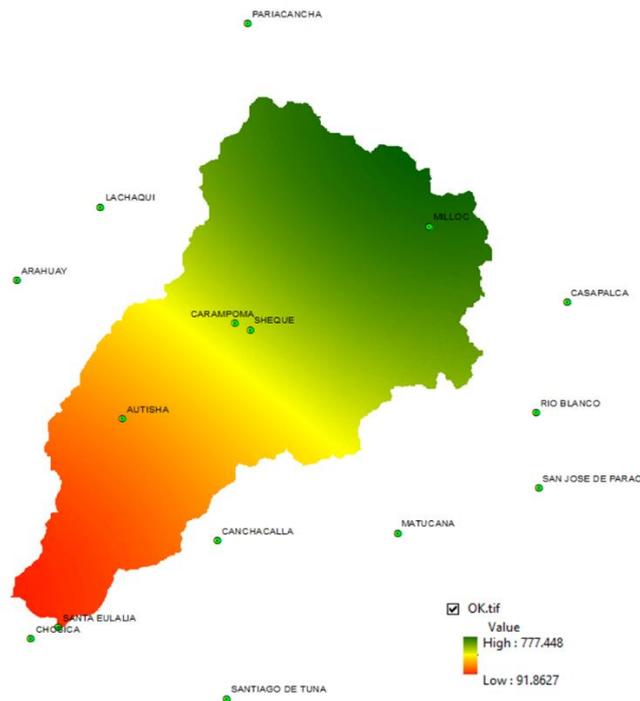


Figura 23. Interpolación de la precipitación utilizando Kriging ordinario

Fuente: Elaboración propia

La interpolación utilizando el método *Kriging* también arroja un coeficiente de correlación alto, sin embargo, es más bajo comparado con el IDW.

El factor precipitación se podría decir que es un factor crítico para el crecimiento óptimo de las plantas, en nuestro caso especies forestales, sobre todo en los primeros años de crecimiento donde la planta necesita de este recurso para su establecimiento a medida que va desarrollando su sistema radicular para alcanzar niveles más profundos.

El mapa de precipitación obtenido concuerda con los resultados del mapa elaborado por el SENAMHI (2016) para la cuenca del Rímac, donde se puede observar que en la parte baja se tienen una precipitación de hasta 0 a 50 mm, llegando a la parte más alta de la subcuenca a los 1000 mm anuales para el periodo de 1990-2015.

Como se puede observar los rangos de precipitación fluctúan entre los 30 mm hasta los 940 mm, y según los requerimientos de las especies, cada una de estas tendrá diferentes áreas en las que su requerimiento para precipitación será óptimo y tendrá una valoración de 1.

A continuación, se muestran las diferentes áreas para las 4 especies que son aptas y no aptas.

Quinual (Polylepis incana)

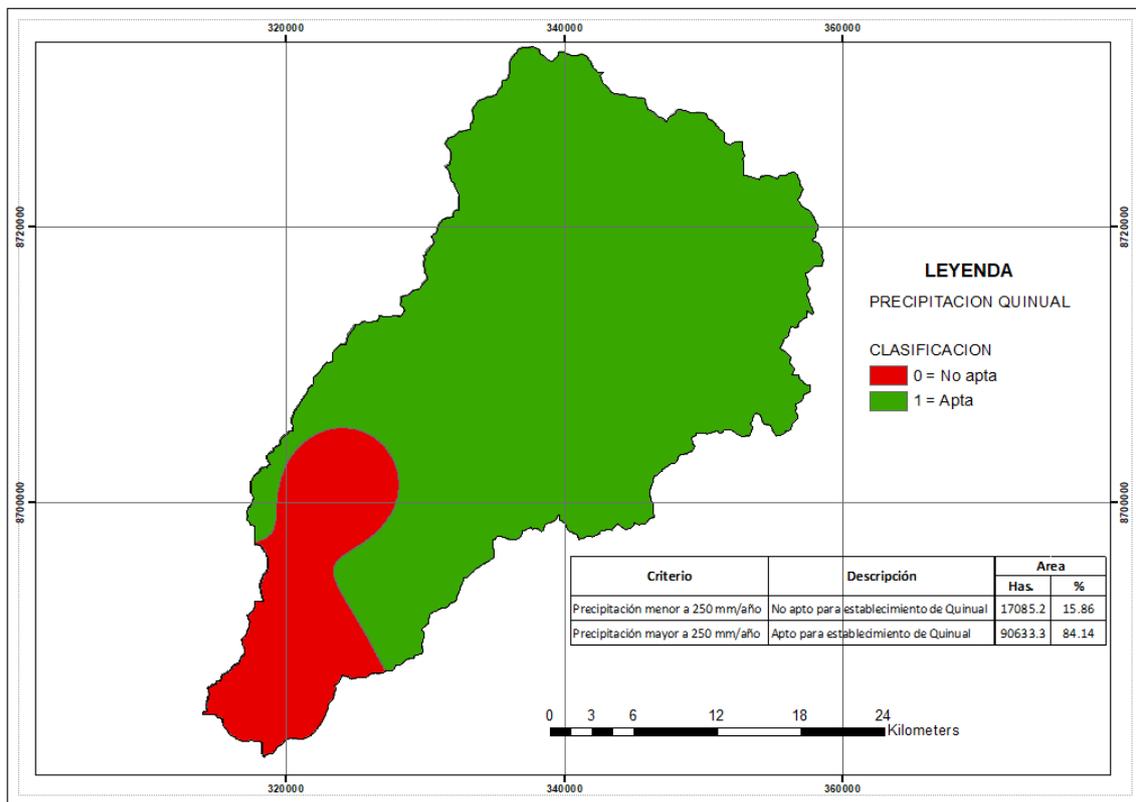


Figura 24. Zonas aptas y no aptas en precipitación para el Quinual

Fuente: Elaboración propia

Del total del área de la subcuenca, el 84% presenta condiciones óptimas de precipitación para el crecimiento óptimo del Quinual, cuyo requerimiento hídrico va desde los 250 mm/año según Hoch y Korner (2005). Esto nos da una idea de que la dispersión de esta especie puede ser amplia dentro de la subcuenca.

Colle (*Buddleja coriácea*)

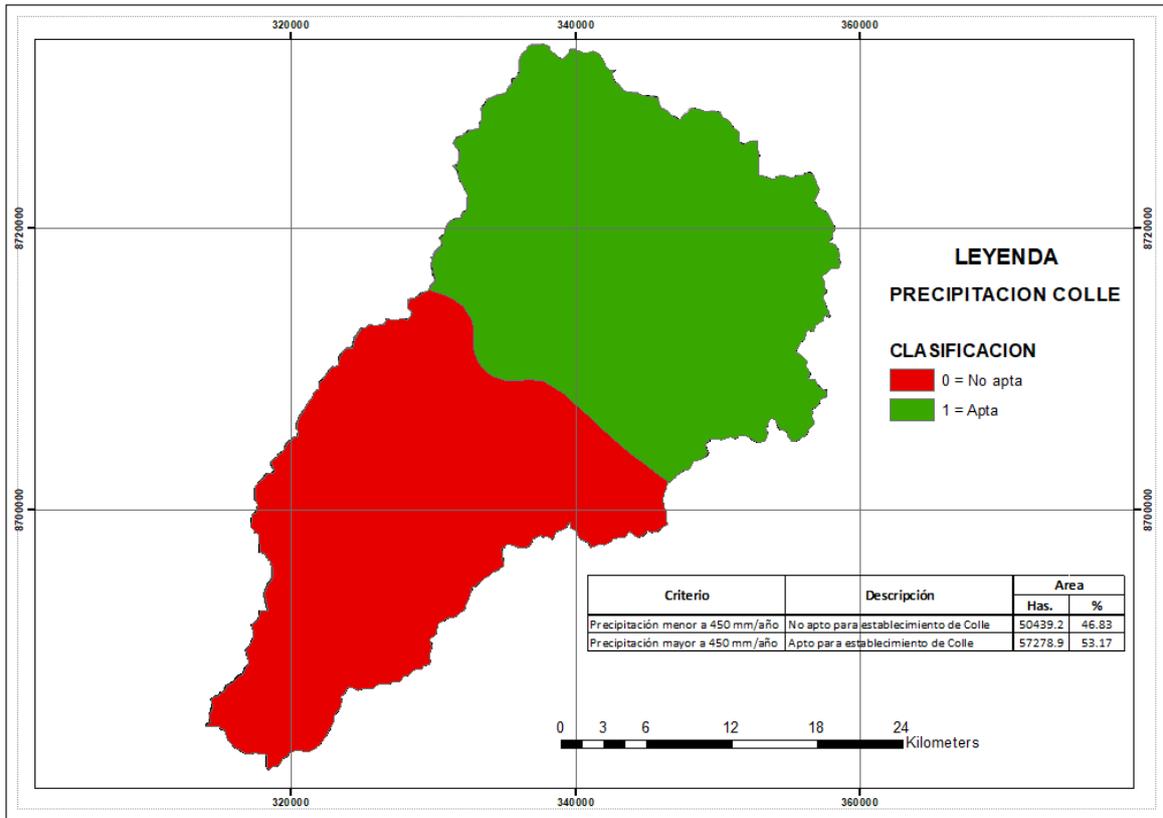


Figura 25. Zonas aptas y no aptas en precipitación para el Colle

Fuente: Elaboración propia

Para esta especie, según los requerimientos en precipitación mayores a 450 mm/año, poco más del 53% del área es óptimo para su crecimiento, lo cual corresponde a 57 278 has.

Como se puede observar esta especie es más exigente en cuanto a la disposición del recurso hídrico, lo cual lo limita a crecer en zonas bajas ya que como vimos la precipitación tiene mucha correlación con la altitud.

Lloque (*Kageneckia lanceolata*)

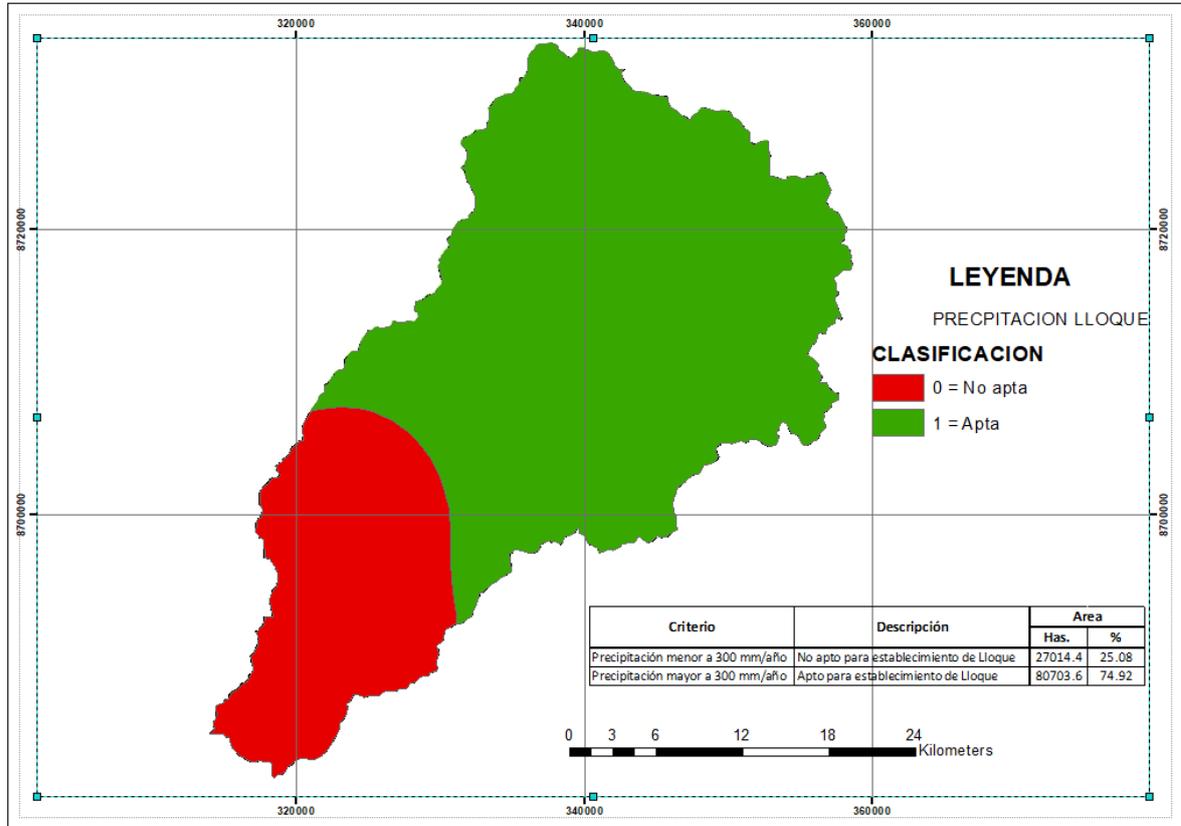


Figura 26. Zonas aptas y no aptas en precipitación para el Lloque

Fuente: Elaboración propia

Según Rohner (2023), podemos encontrar a esta especie a partir de los 300 mm/año, lo cual, para nuestra zona de estudio, corresponde a un área optima de precipitación de 80 703 has siendo esto el 74,92% del total de la subcuenca.

Chachacomo (*Escallonia myrtilloides*)

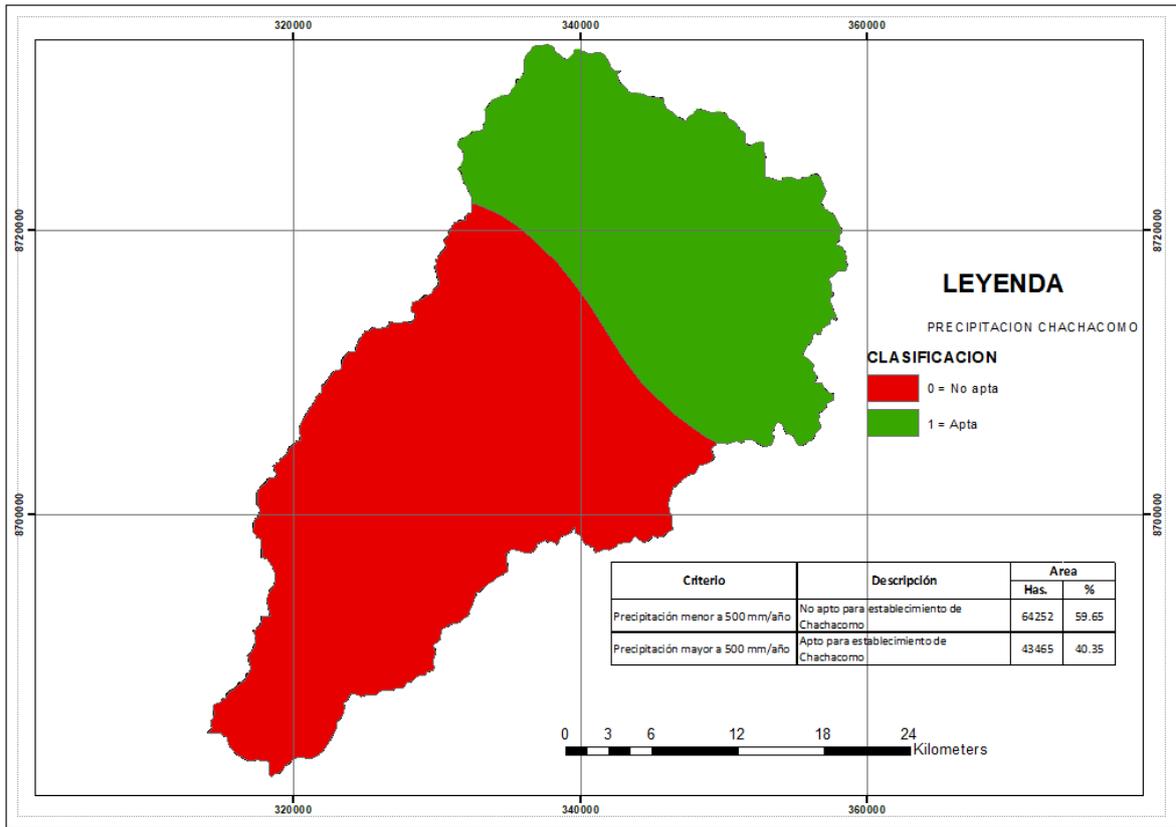


Figura 27. Zonas aptas y no aptas en precipitación para el Chachacomo

Fuente: Elaboración propia

El Chachacomo es la especie que requiere mayor precipitación para su crecimiento óptimo con más de 500 mm/año, lo cual representa el 40,35% del área de la subcuenca con 43 465 has. Se pueden inferir por lo tanto que esta especie se encontrara en la cabecera de cuenca.

4.1.2. Temperatura

Para el caso de la temperatura, se separó esta variable en temperatura máxima y temperatura mínima que se alcanza dentro de la subcuenca, ya que las plantas tienen dentro de sus requerimientos un umbral máximo y mínimo de temperatura que pueden soportar. Después de la precipitación, es quizá la temperatura el factor más importante para el crecimiento óptimo de las especies.

A continuación, se muestra los métodos de interpolación y la elección del método elegido para el modelamiento.

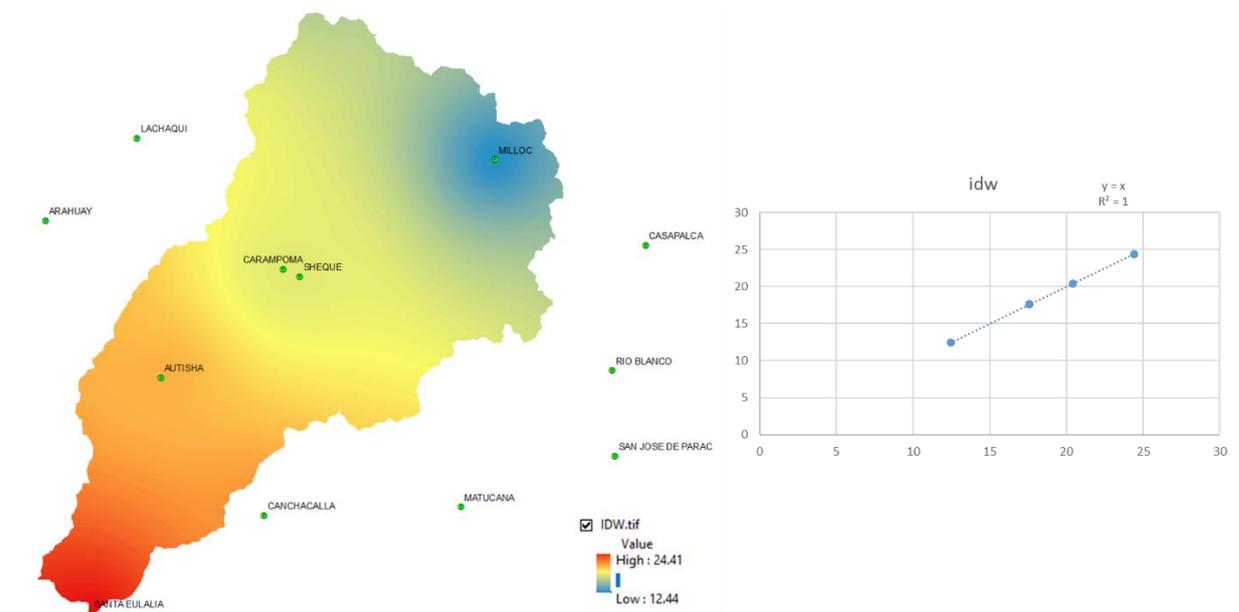


Figura 28. Interpolación de la temperatura máxima utilizando IDW

Fuente: Elaboración propia

El método de interpolación IDW resulta el más efectivo con un coeficiente de correlación de 1, razón por la cual se eligió los resultados de este método para el modelamiento.

El resultado obtenido con la interpolación IDW es muy parecido a lo obtenido por el Observatorio del Agua Chillón Rímac Lurín (2019), con valores entre 20 a 24 °C en la parte baja de la subcuenca y de 8 a 12 °C en la parte alta.

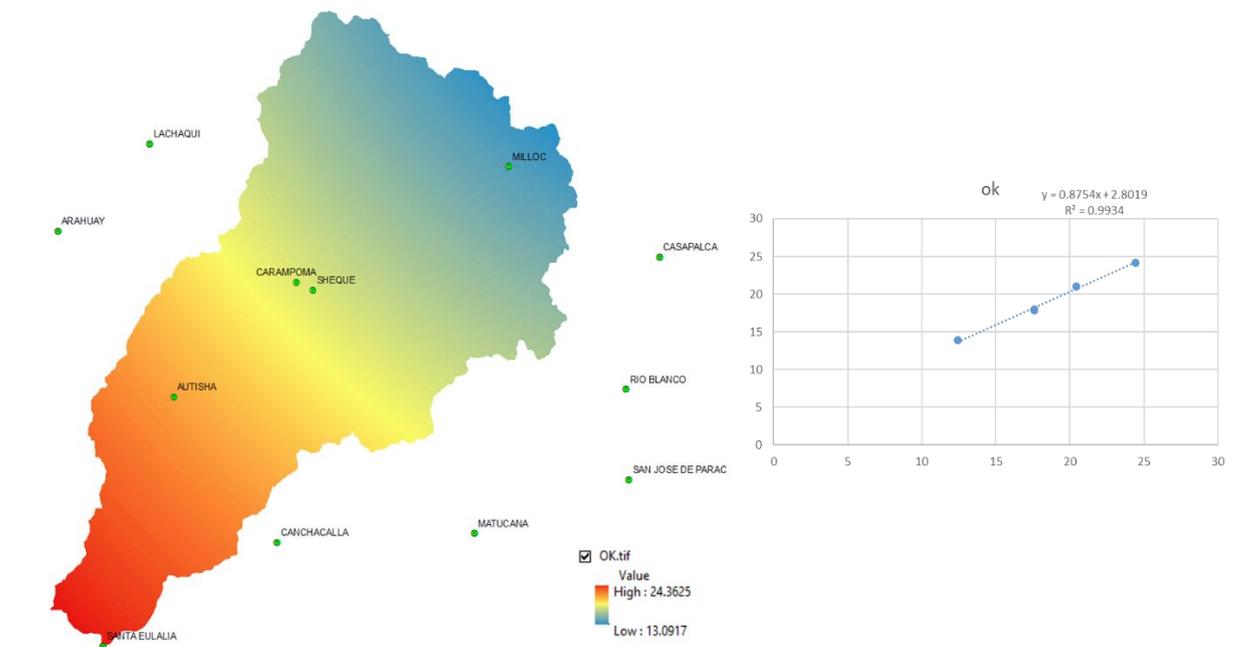


Figura 29. Interpolación de la temperatura máxima utilizando kriging ordinario

El método de interpolación mencionado también resulta efectivo, ya que presenta un alto coeficiente de correlación del 99,34%. Sin embargo, el método de IDW se considera superior.

Los valores alcanzados para la temperatura máxima en los diferentes niveles de altitud de la subcuenca se compararon con los requerimientos de esta misma variable de las especies forestales propuestas y todas cumplen al estar dentro de estos rangos, es por ello que la reclasificación de temperatura máxima para toda la subcuenca es apta y tiene el valor de 1.

Es decir que para esta variable no existe ninguna restricción para el óptimo crecimiento de las especies.

La reclasificación de la temperatura máxima en zonas aptas (1) y no aptas (0), arrojó como resultado, que, para todas las especies forestales, el área de la subcuenca es una zona optima por presentar valores de temperatura que están dentro del rango de los requerimientos de estas especies. Por lo que el mapa para todas las especies se vería de la siguiente manera:

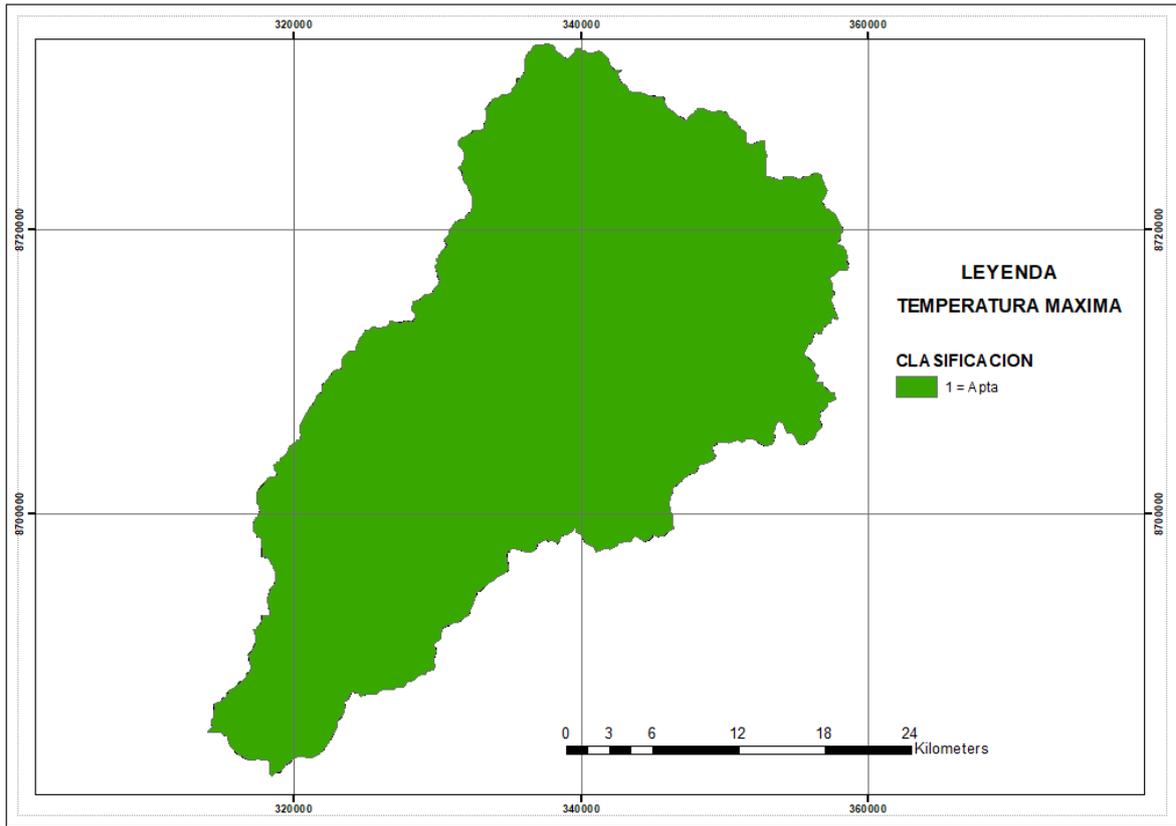


Figura 30. Zonas aptas en temperatura máxima para las 4 especies

Fuente: Elaboración propia

Según lo señalado por Cardoso y Zanabria (2023) estas 4 especies tienen un umbral máximo de temperatura de 25 °C y como el área presenta una temperatura máxima de 24.4 °C, hace que toda la subcuenca sea apta para el crecimiento óptimo de las especies.

A continuación, se presenta la interpolación con ambos métodos para la temperatura mínima.

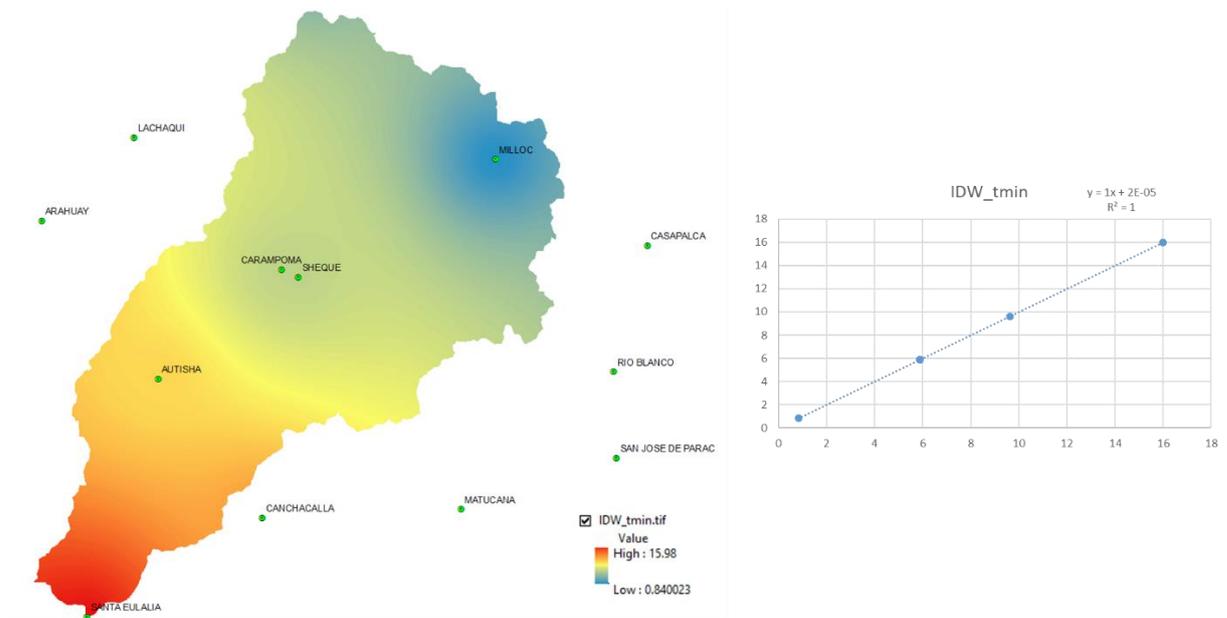


Figura 31. Interpolación de la temperatura mínima utilizando IDW

Fuente: Elaboración propia

Al igual que en el caso anterior la correlación con el método de interpolación IDW es perfecto y por ello es el elegido para usarlo en el modelamiento final.

Asimismo, los resultados obtenidos son similares a los obtenidos por el Observatorio del Agua Chillón Rímac Lurín (2019), con rangos entre 12 y 16 °C para la parte baja de la subcuenca, habiendo una pequeña diferencia para la parte alta donde los valores mínimos llegan a estar entre los -8 y -4 °C y lo que se obtuvo presenta un valor mínimo de 0.8 °C.

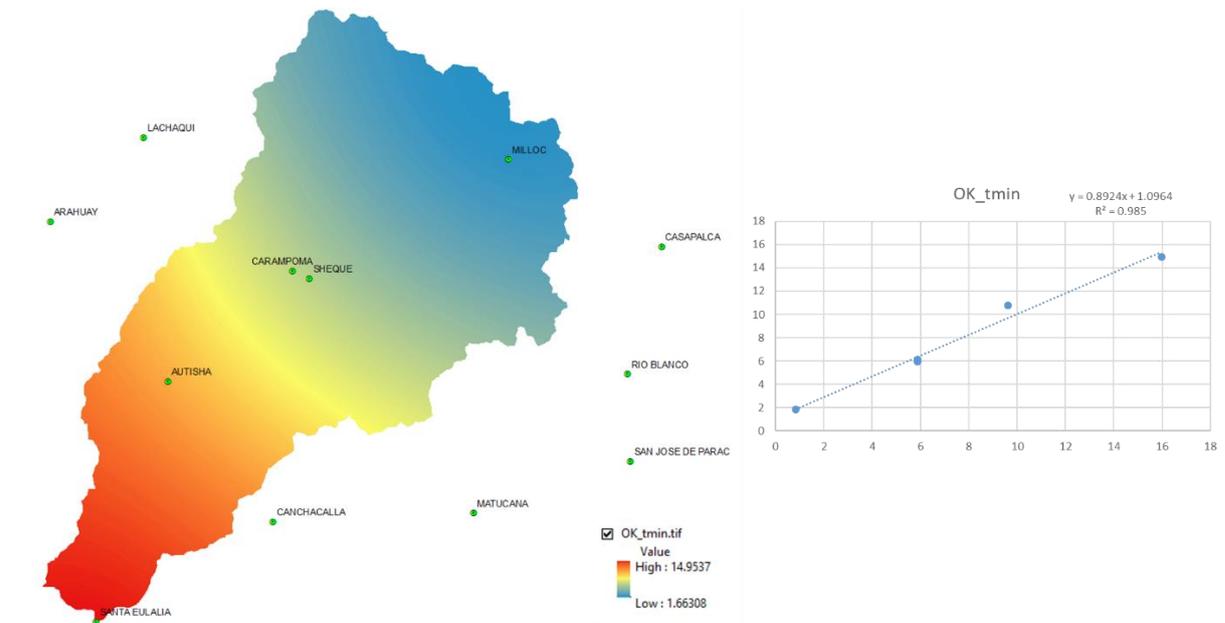


Figura 32. Interpolación de la temperatura mínima utilizando kriging ordinario

Fuente: Elaboración propia

La correlación obtenida con el método *Kriging* también es muy buena (98,5%) para el caso de la temperatura mínima en la subcuenca, el valor mínimo es de 0,84°C en las partes más altas de la subcuenca. como el rango de todas las especies está dentro de lo que se tiene en el área de estudio, se tiene que toda la subcuenca es apta en temperatura para el desarrollo óptimo de estas especies.

Para el caso de la reclasificación de la temperatura mínima, esta es óptima para toda la cuenca para las especies; Quinual, Colle, Lloque y Chachacomo, por lo que el mapa se vería de la siguiente manera.

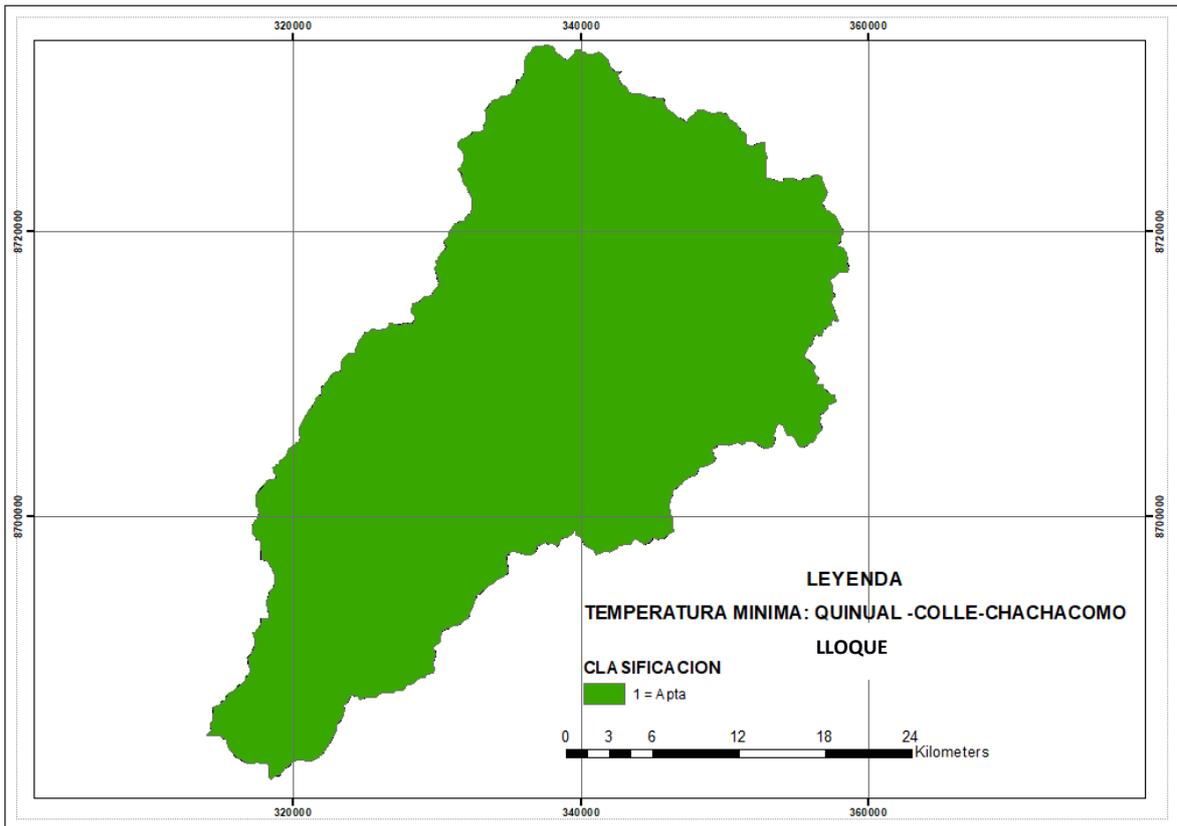


Figura 33. Zonas aptas en temperatura mínima para las 4 especies

Fuente: Elaboración propia

4.1.3. pH

El suelo es también un factor importante para el crecimiento de las plantas, pues es en el dónde se desarrollan las raíces que sirven entre otras cosas, para la absorción de nutrientes y para que la planta pueda sostenerse en pie. Además de tener una marcada influencia en la distribución de las especies como lo menciona (Clark *et al.* 1995).

Como se mencionó anteriormente, se consideraron las variables de acidez (pH) y textura del suelo para realizar el modelamiento.

Para conocer el pH del suelo de la subcuenca también se realizó la interpolación con el método IDW y *Kriging* ordinario y se muestran a continuación:

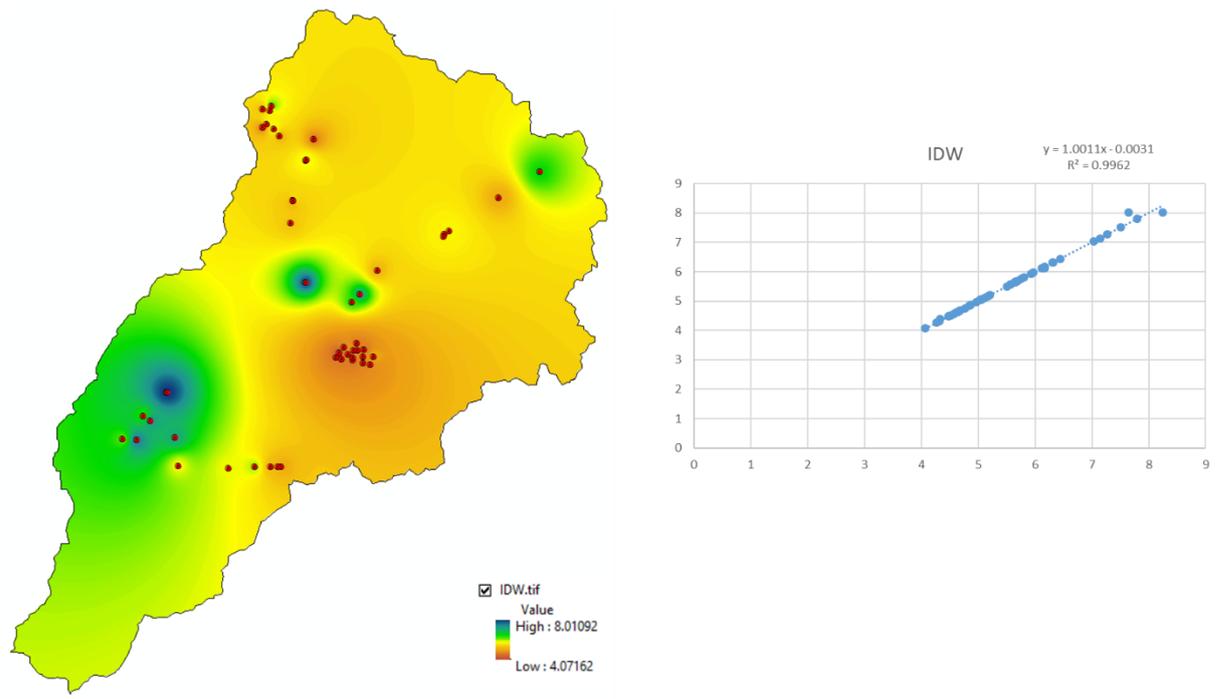


Figura 34. Interpolación del pH del suelo utilizando IDW

El pH del suelo en la subcuena fluctúa entre 4 y 8, como se muestra en la interpolación con el método IDW el cual se eligió para el modelamiento por presentar un coeficiente de correlación de 99,62%.

El resultado obtenido mediante esta interpolación coincide además por lo encontrado en el estudio de INADE (1997) en los cuales muestra un rango de pH para cada asociación de suelo. Para el misceláneo Roca-Campamento (R-Cm) el pH varía entre 5.3 a 7.2 y los valores del raster están dentro de este rango como se puede apreciar en la siguiente figura.

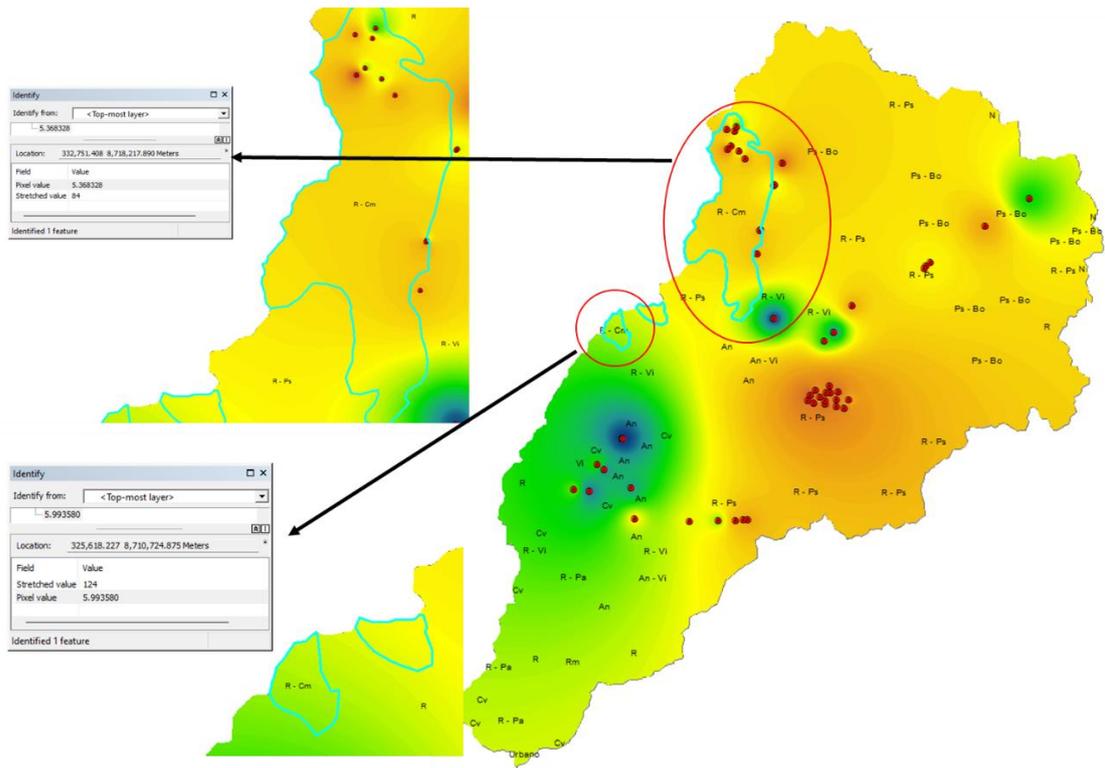


Figura 35. Comparación de pH obtenido por IDW y estudios de INADE (1997) para el misceláneo Roca-Campamento

Fuente: Elaboración propia

Para el misceláneo Roca – Paye (R-Pa), el pH varía entre 6.9 y 7.5 según lo encontrado por el INEI (2018), la interpolación IDW es muy parecida, sin embargo, se puede observar que hay valores que están por fuera del rango, pero son cercanos.

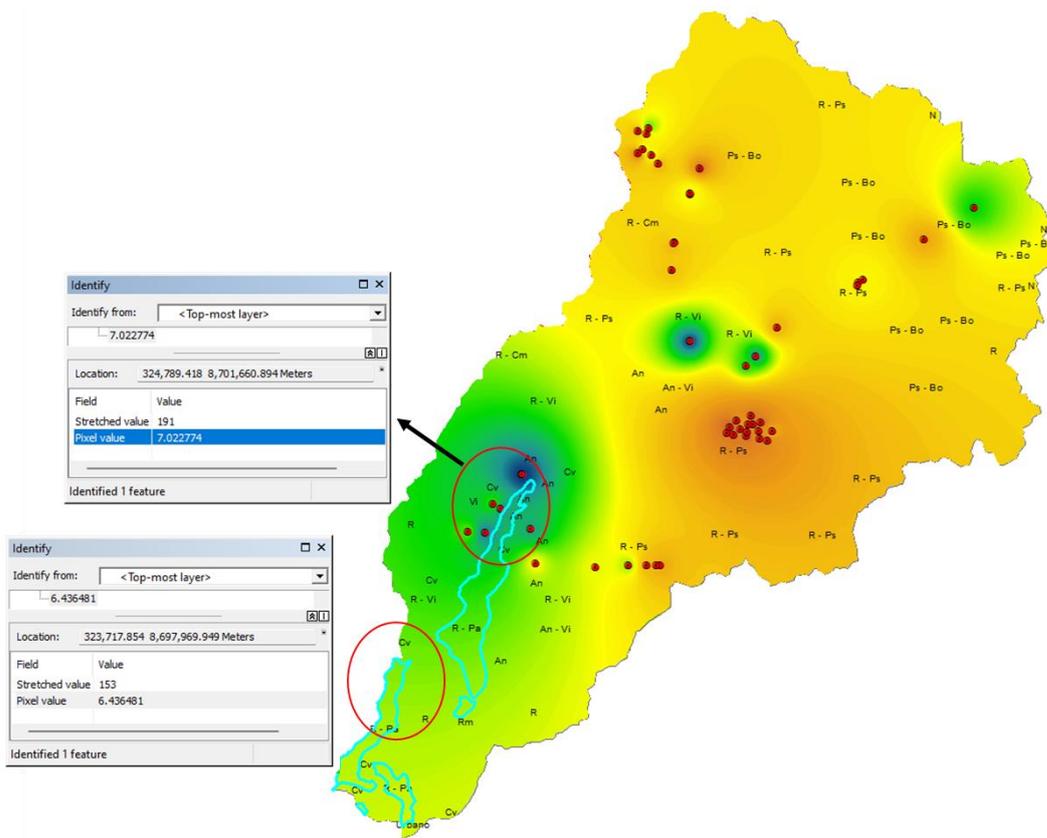


Figura 36. Comparación de pH obtenido por IDW y estudios de INADE (1997) para el misceláneo Roca-Paye

Fuente: Elaboración propia

Para el suelo visó el INADE (1997) encontró que los valores de pH están entre 6.1 y 7.3, lo cual se encuentra dentro del rango de lo generado por la interpolación IDW pues los valores se encuentran dentro de este rango (figura 38).

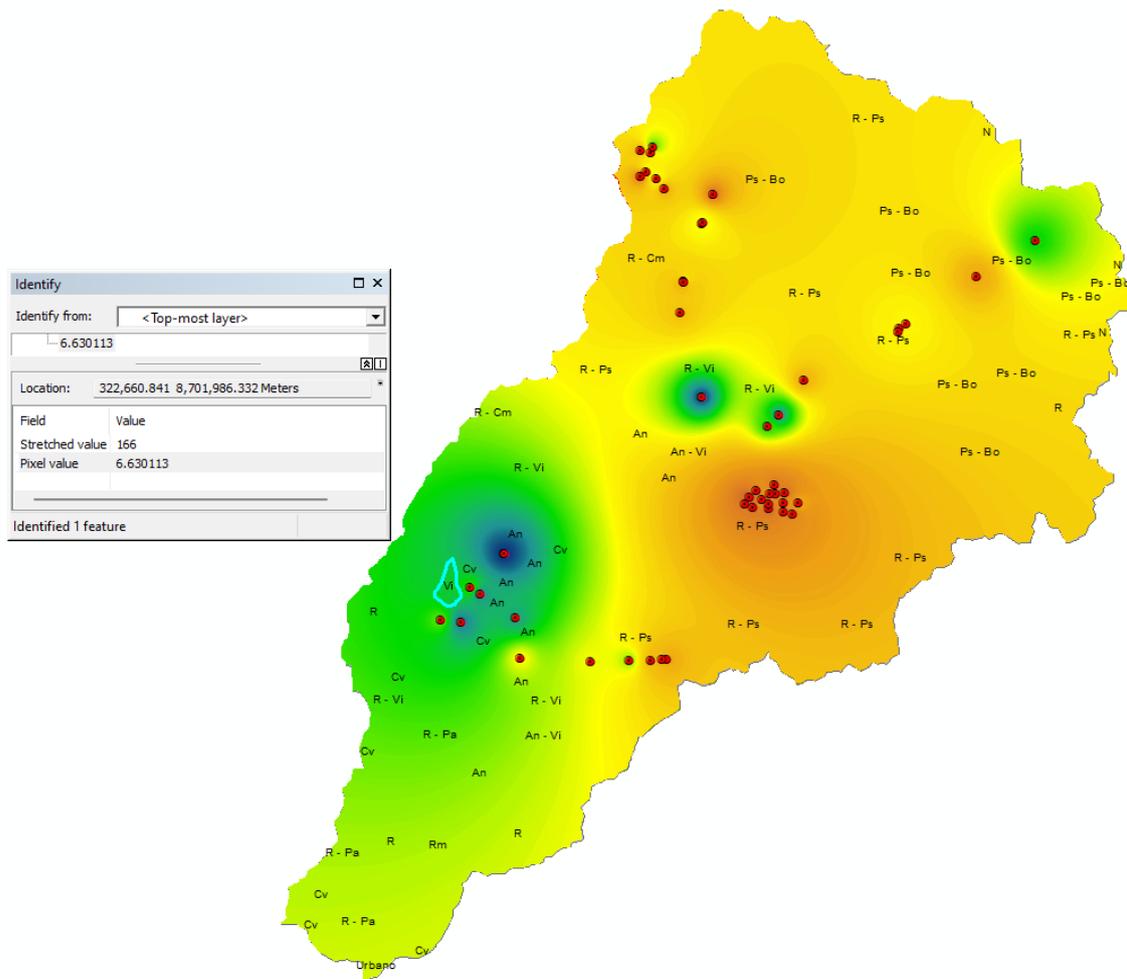


Figura 37. Comparación de pH obtenido por IDW y estudios de INADE (1997) para el suelo Viso

Como se puede observar, los datos generados a partir de la interpolación que a su vez se generaron gracias a las muestras recogidas en campo, coinciden por lo encontrado por el estudio del INADE (1997). Esta información es muy importante ya que no existe mucha información acerca de la acidez del suelo para estudios de este tipo, lo cual puede deberse al costo de los análisis de laboratorio, el área de estudio, la accesibilidad a los puntos y toda la logística que involucra la recolección de estas muestras.

Durante la recolección de estas muestras, que se tomaron a los 40 cm de profundidad, se pudo observar que los suelos si cumplen con la profundidad que requieren las plantas para su establecimiento.

Además, se realizó la interpolación con el método *Kriging*, el cual arrojo un coeficiente de correlación de 79,73%, sin embargo, una vez más el método IDW resulta ser el más adecuado y los resultados obtenidos por este son los que se tomaron para realizar el modelamiento.

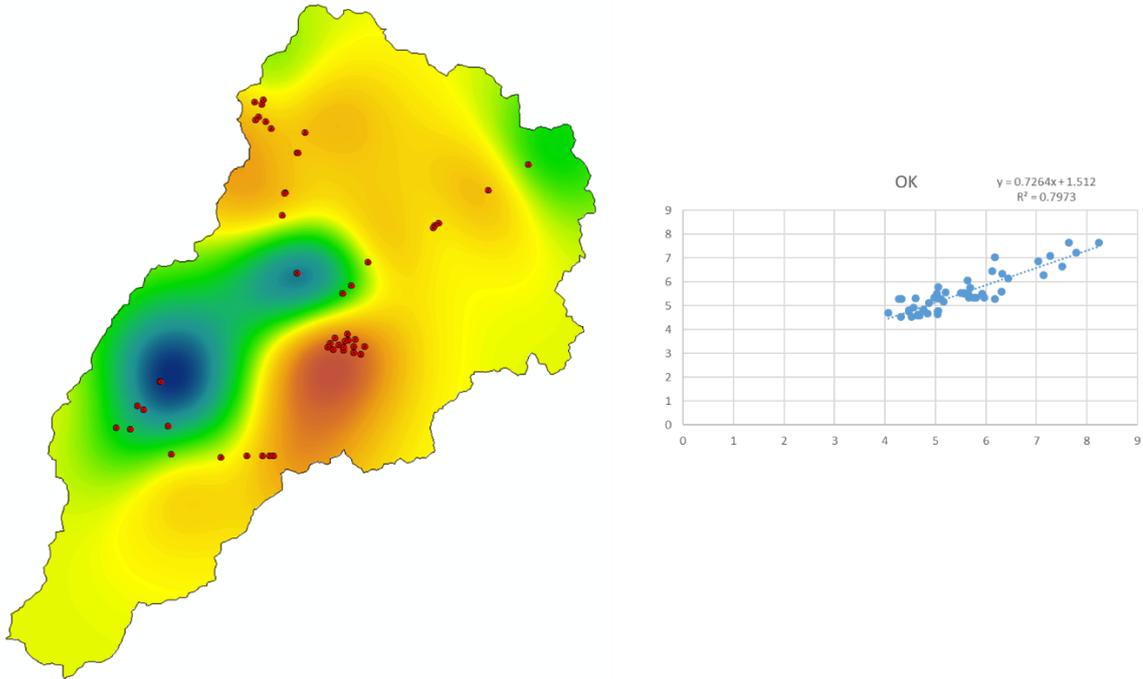


Figura 38. Interpolación del pH del suelo utilizando Kriging

Fuente: Elaboración propia

Con esta información generada para la variable acidez (pH), se generaron los mapas de áreas aptas y no aptas para las diferentes especies según su requerimiento y se muestran a continuación:

Quinual (*Polylepis incana*)

Los requerimientos para pH del suelo de esta especie van entre los 4 a 8, lo cual es igual a los rangos de pH dentro de la subcuenca, es por ello que para esta especie la totalidad de la cuenca es apta en cuanto a acidez por lo que la valoración que se tiene es de 1.

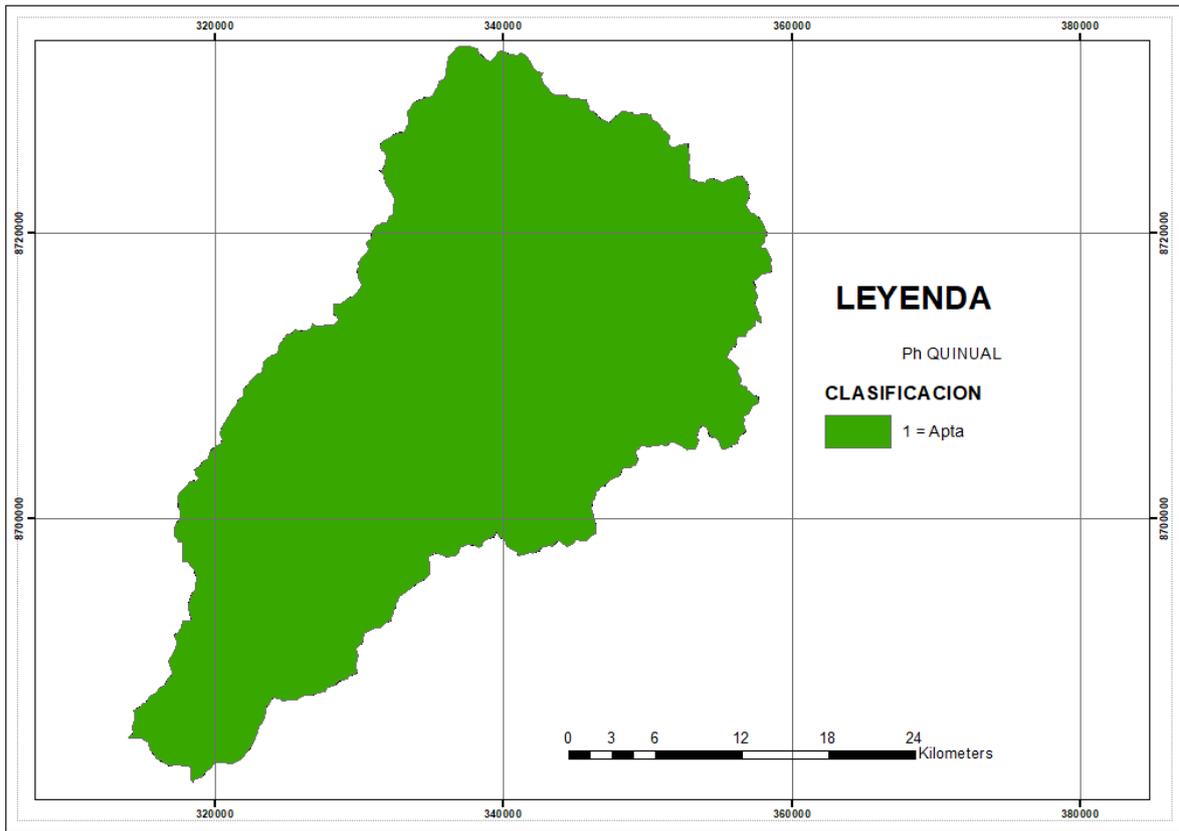


Figura 39. Zonas aptas en pH para el Quinual

Fuente: Elaboración propia

Colle (*Buddleja coriácea*)

Según Rohner (2023), esta especie el rango óptimo de pH para su crecimiento va desde los 5 a 7.8, asimismo, Cardoso y Zanabria (2023) señalan un rango muy similar indicando su crecimiento óptimo entre 5 a 7. Según el reglamento de clasificación de tierras por su capacidad de uso mayor (2011), estos valores corresponden a suelos fuertemente ácidos hasta ligeramente alcalinos lo que nos da un área bastante extensa para su crecimiento dentro de la subcuenca con poco más del 94% de áreas aptas.

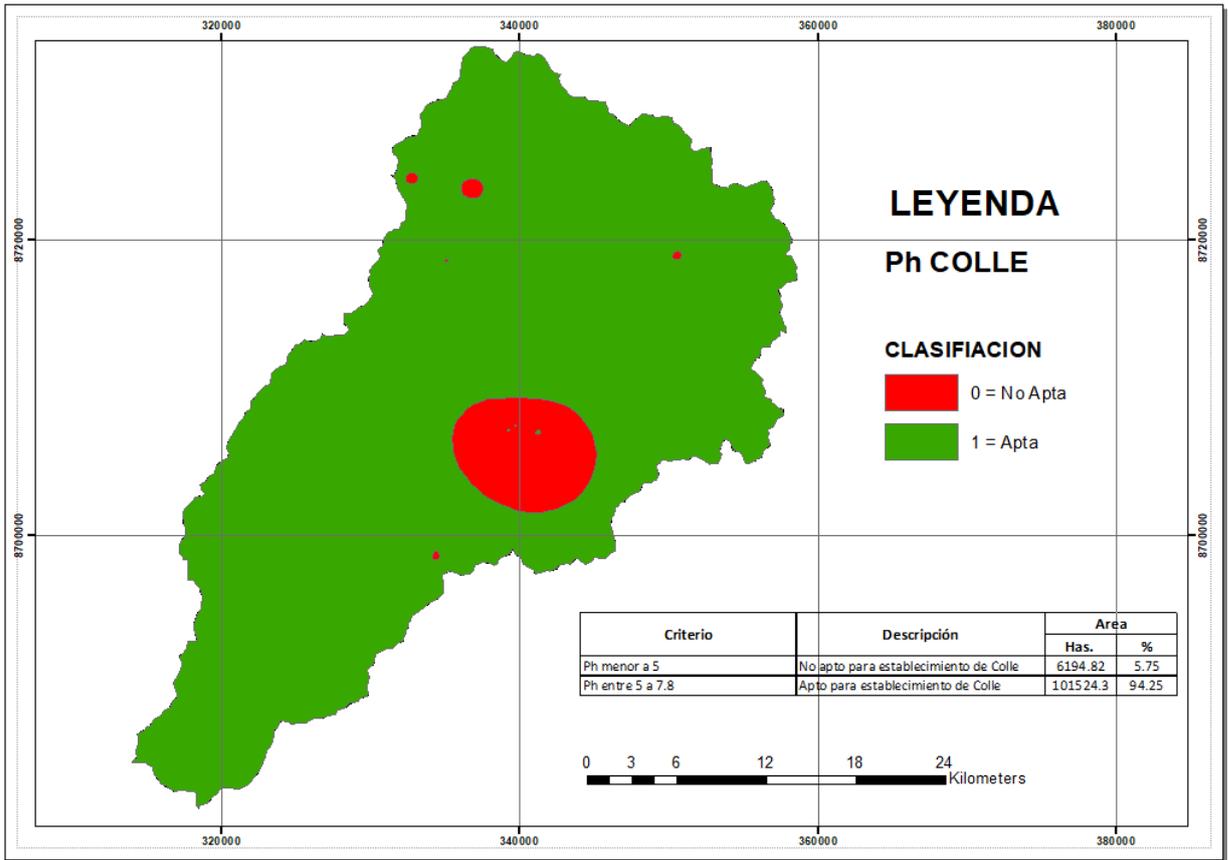


Figura 40. Zonas aptas en pH para el Colle

Fuente: Elaboración propia

Lloque (*Kageneckia lanceolata*)

Para el caso del Lloque, Rohner (2023) señala que su crecimiento óptimo se da en un pH ligeramente alcalino (7.4 a 7.8), sin embargo, Cardoso y Zanabria (2023) mencionan un rango más amplio que va desde muy fuertemente ácido hasta ligeramente alcalino (4 a 7.8). Es así que, tomando el rango más amplio, la totalidad de la subcuenca sería apta en pH para su crecimiento.

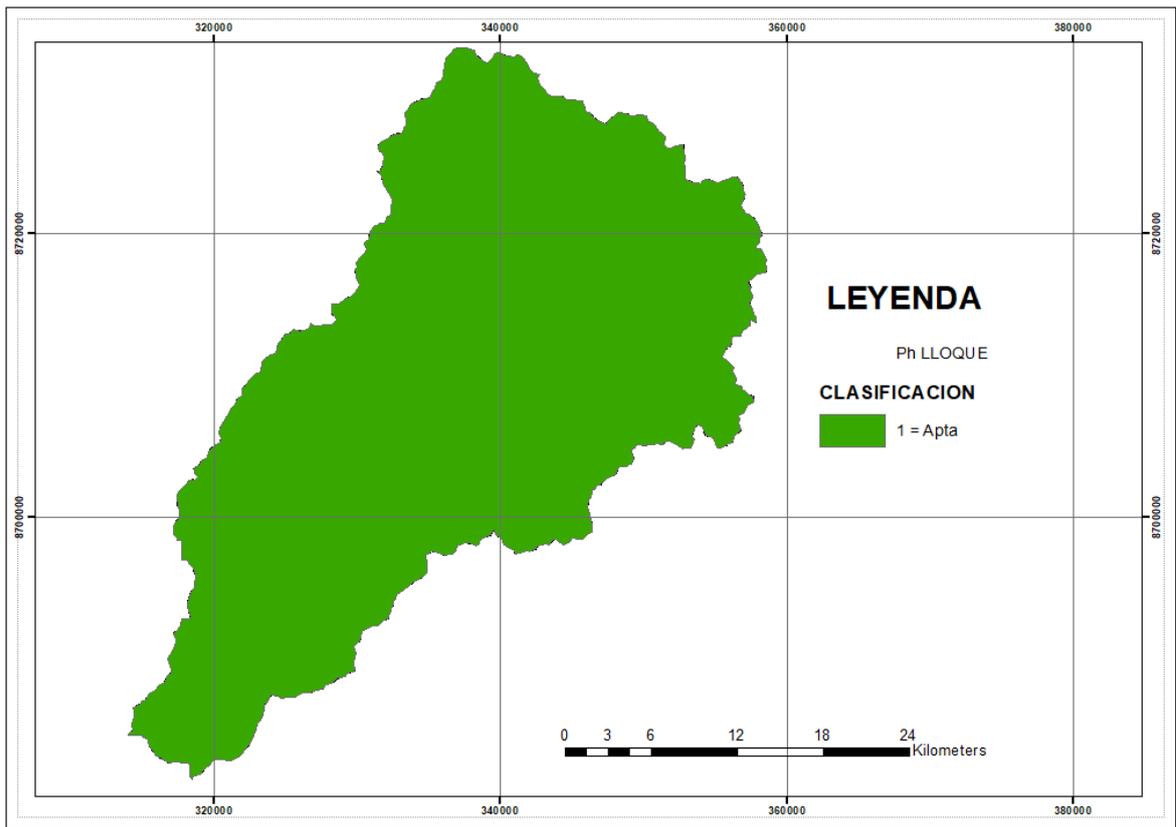


Figura 41. Zonas aptas en pH para el Lloque

Fuente: Elaboración propia

Chachacomo (*Escallonia myrtilloides*)

El requerimiento en pH para esta especie es la misma que para el Colle, con un rango entre 5 a 7.8. Sin embargo, Rohner (2023) menciona que el rango optimo va de ligeramente acido a ligeramente alcalino (6 a 7.8). Por su parte Cardoso y Zanabria (2023) sostienen que el rango optimo es más amplio siendo este de 5 a 7. Tomando ambas Fuentes, el área apta para el crecimiento es igual a la del Colle con 101 524 has (94%).

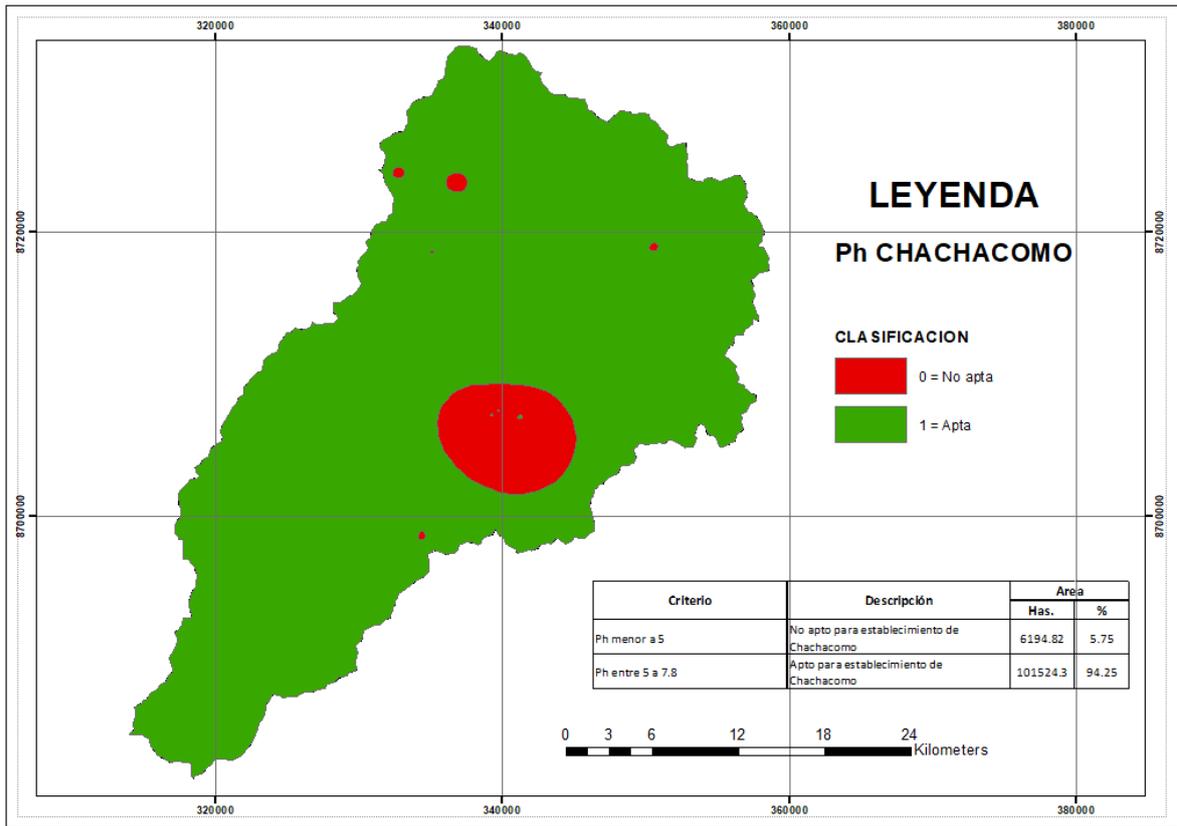


Figura 42. Zonas aptas en pH para el Chachacomo

Fuente: Elaboración propia

4.1.4. Textura

La otra variable del suelo que se consideró para el modelamiento es la textura que también fue tomada en cuenta por Rau (2012) al determinar áreas con aptitud forestal en la provincia de Tarma.

Al igual que las variables anteriores, cada especie tiene un requerimiento textural donde su crecimiento es óptimo. Los mapas de zonas aptas y no aptas se presentan a continuación para cada especie.

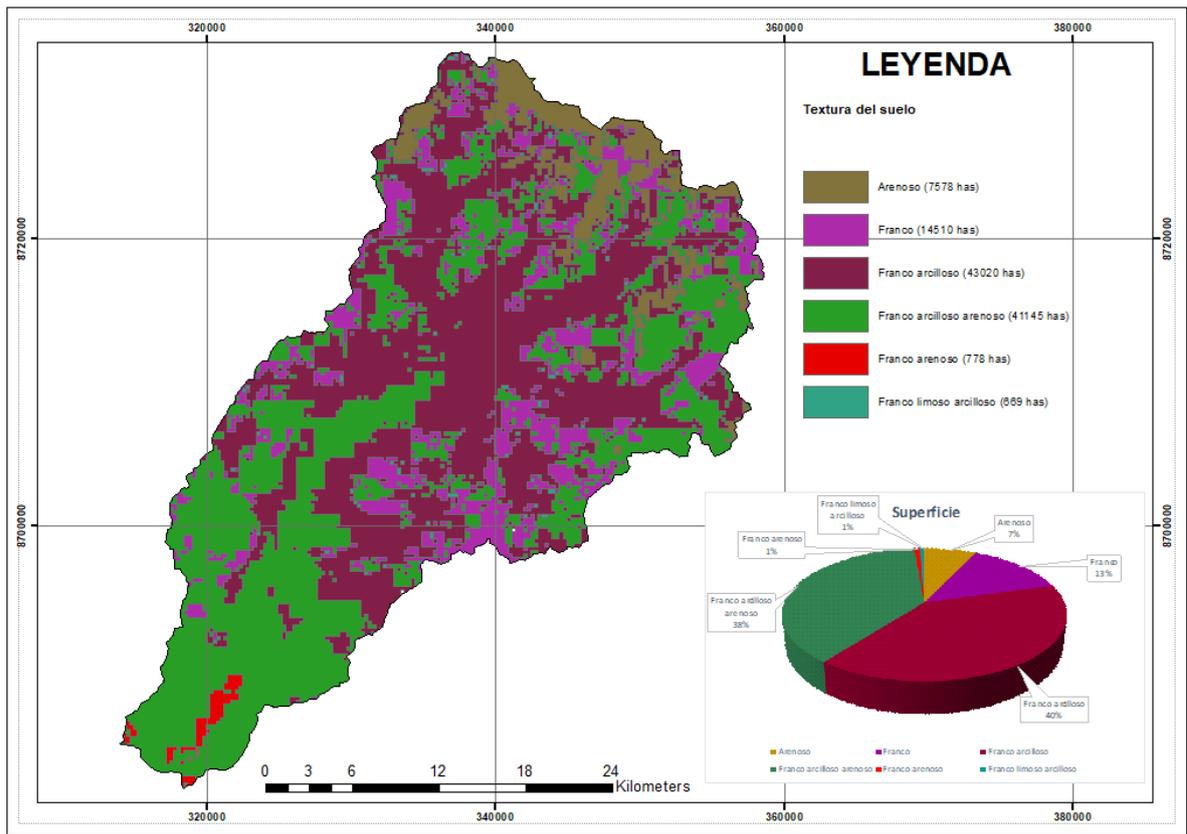


Figura 43. Clase textural de la subcuenca del rio Santa Eulalia

Fuente: Elaboración propia

Como se puede apreciar en la figura 44 las clases texturales con mayor presencia son el franco arcilloso (40%), seguido del franco arcilloso arenoso (38%), en menor presencia tenemos al suelo franco con 13% y arenoso con 7%.

Como menciona Delperio (2023), esta característica del suelo puede verse influenciada por la vegetación que está presente en ella, en este caso las especies forestales pueden influir beneficiosamente a través de su estructura radicular y la captación de nutrientes a partir de la hojarasca que se genere.

Quinual (*Polylepis incana*)

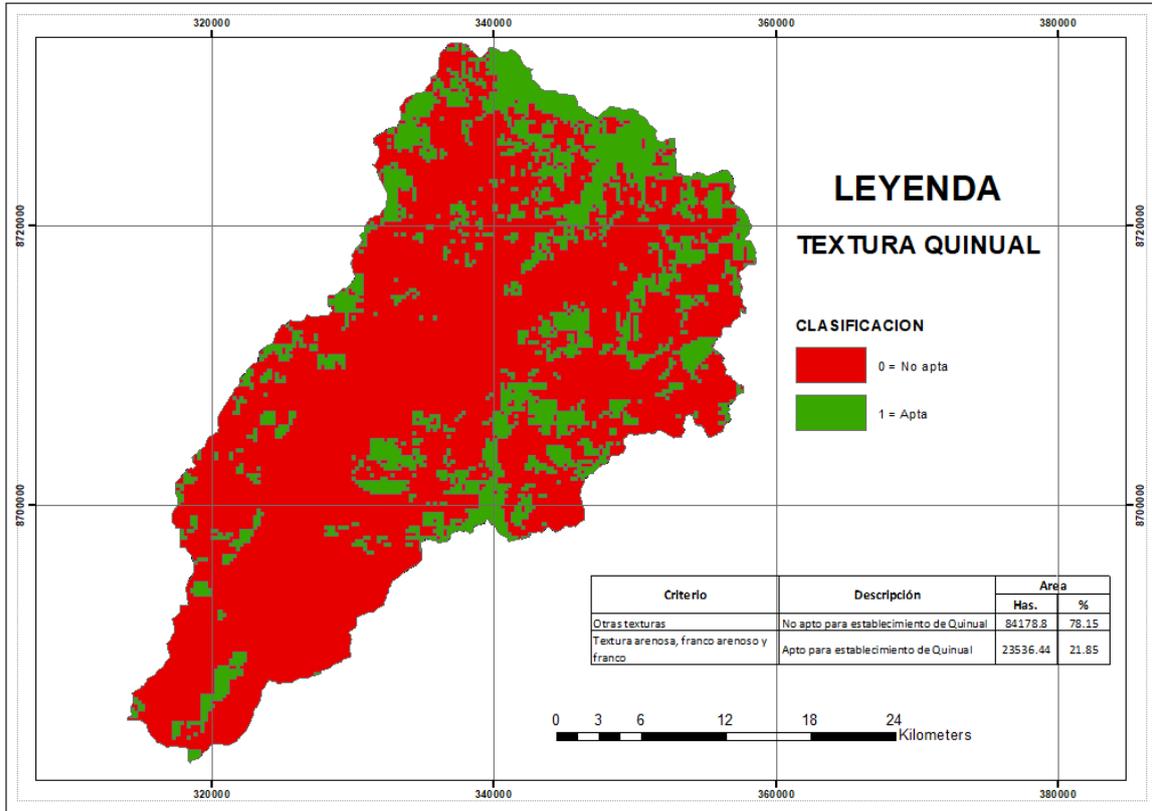


Figura 44. Zonas aptas y no aptas en textura para el Quinual

Fuente: Elaboración propia

Esta especie prefiere suelos arenosos, franco arenosos y francos y a nivel de la subcuenca, estos representan el 21.85% con aproximadamente 23536 has.

Como se puede observar en el mapa a diferencia de las variables anteriores, la capa de textura será una limitante para el área de distribución para esta especie.

Colle (*Buddleja coriácea*)

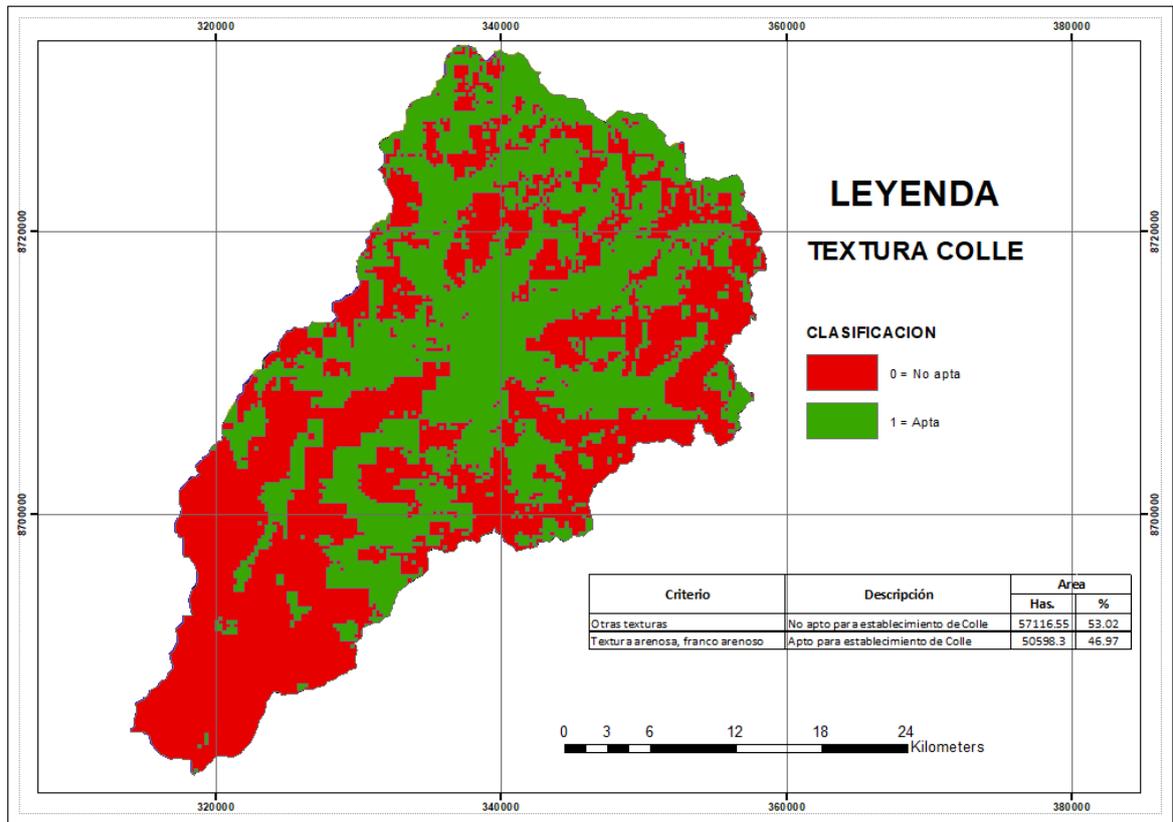


Figura 45. Zonas aptas y no aptas en textura para el Colle.

Fuente: Elaboración propia

Para el Colle, la textura dentro de la cuenca es más favorable ya que presenta un área apta en de casi el 47% de la subcuenca con 50 598 has.

Lloque (*Kageneckia lanceolata*)

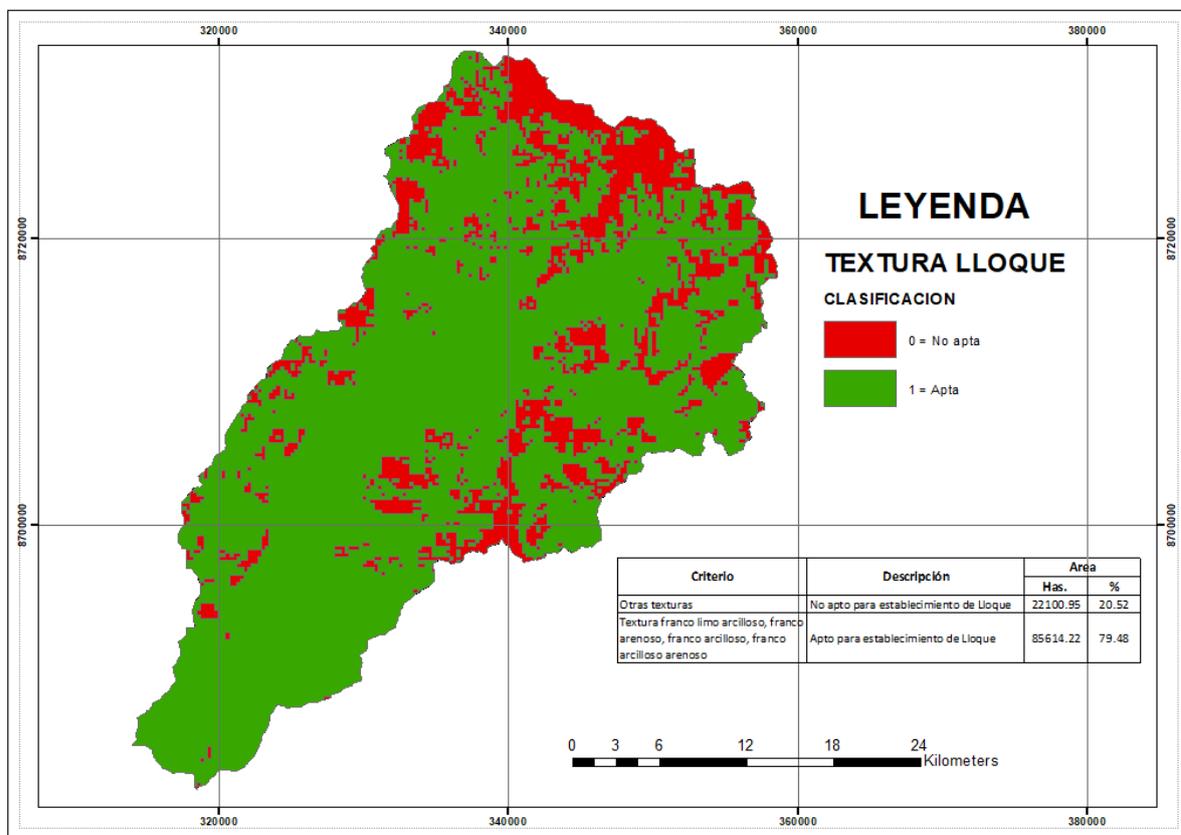


Figura 46. Zonas aptas y no aptas en textura para el Lloque

Fuente: Elaboración propia

Para el caso del Lloque, se puede visualizar que posee un área más extensa en cuanto a zonas aptas en textura y esto se debe a que ésta especie prefiere zonas con textura franco arcilloso y franco arcilloso arenoso, que, justamente son las que más presencia tienen en la subcuenca Santa Eulalia (78%).

Chachacomo (*Escallonia myrtilloides*)

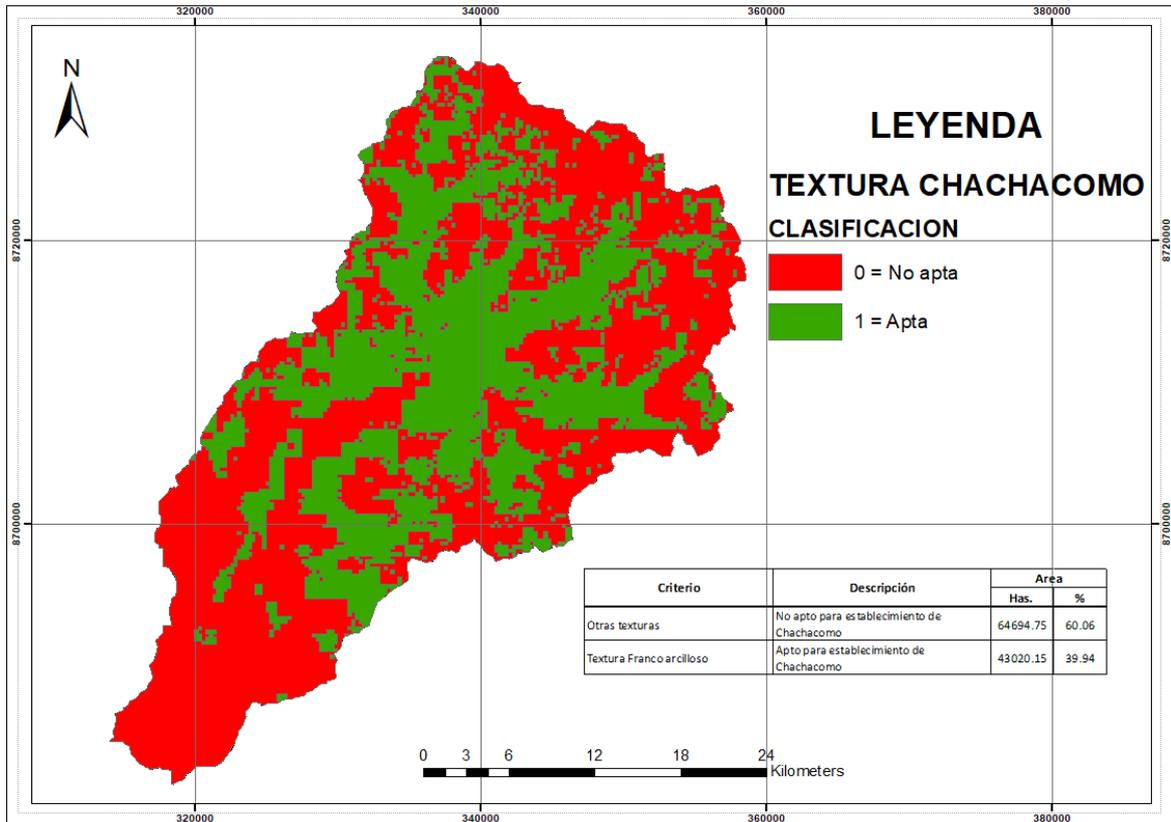


Figura 47. Zonas aptas y no aptas en textura para el Chachacomo

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con lo mencionado por Rohner (2023), esta especie crece bien en suelos de textura franco arcilloso y para el área de estudio corresponde a 43020 has que es el 39% del total del área.

4.1.5. Altitud

La altitud en la subcuenca Santa Eulalia varía desde los 1000 msnm, que es donde se ubica el distrito de Santa Eulalia, más específicamente el área urbana, siendo este el punto de acceso a la cuenca ingresando por la carretera Central, hasta los 5000 msnm, ubicado en las cumbres de la cuenca alta, que es conocida como la zona de tundra o nival, estas altitudes presentan condiciones muy adversas, en suelo y temperatura, para el desarrollo y crecimiento de plantas.

Sin embargo, el género *Polylepis*, puede crecer en estas altitudes como lo mencionan Reynel & León (1990).

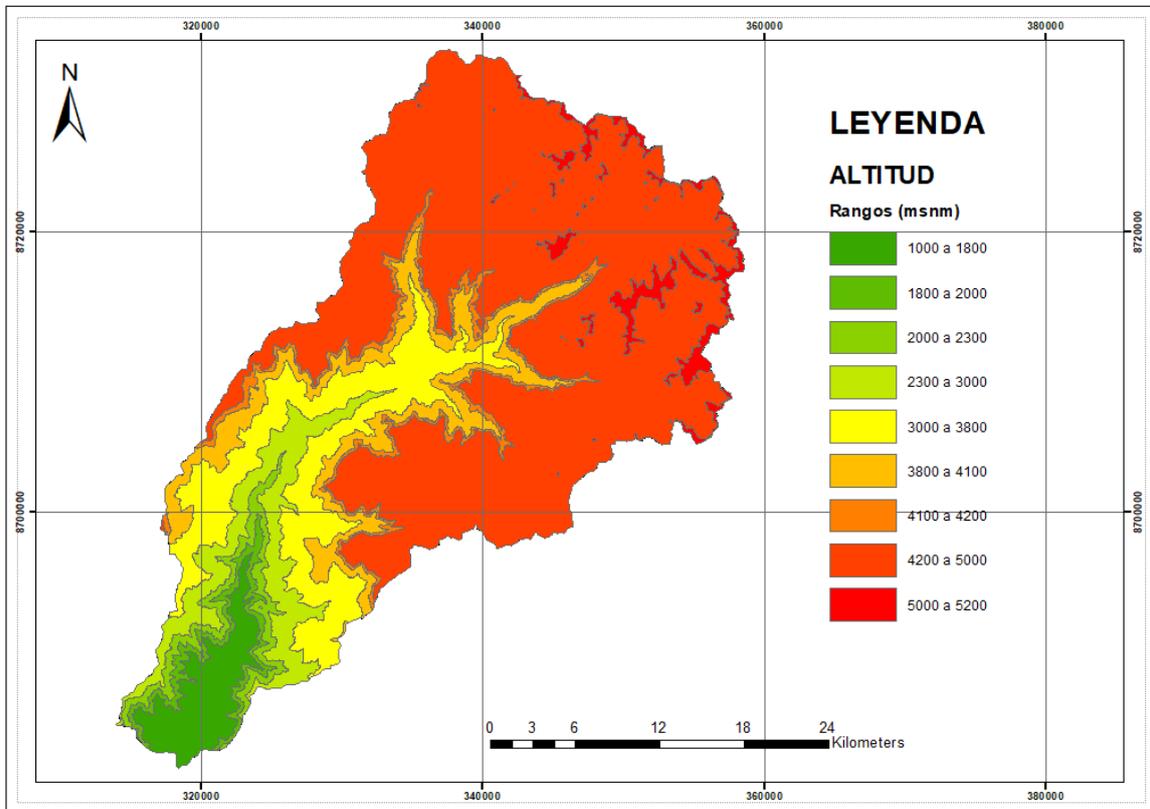


Figura 48. Mapa de rango altitudinal de la subcuenca

Fuente: Elaboración propia

Este mapa se generó a partir de rangos que fueron ordenados de tal forma que coincidan con los requerimientos de las especies. De esta forma no existe un cruce al momento de realizar la reclasificación en zonas aptas (1) y no aptas (0).

A continuación, se presentarán los mapas obtenidos producto de la reclasificación para cada especie.

Quinual (*Polylepis incana*)

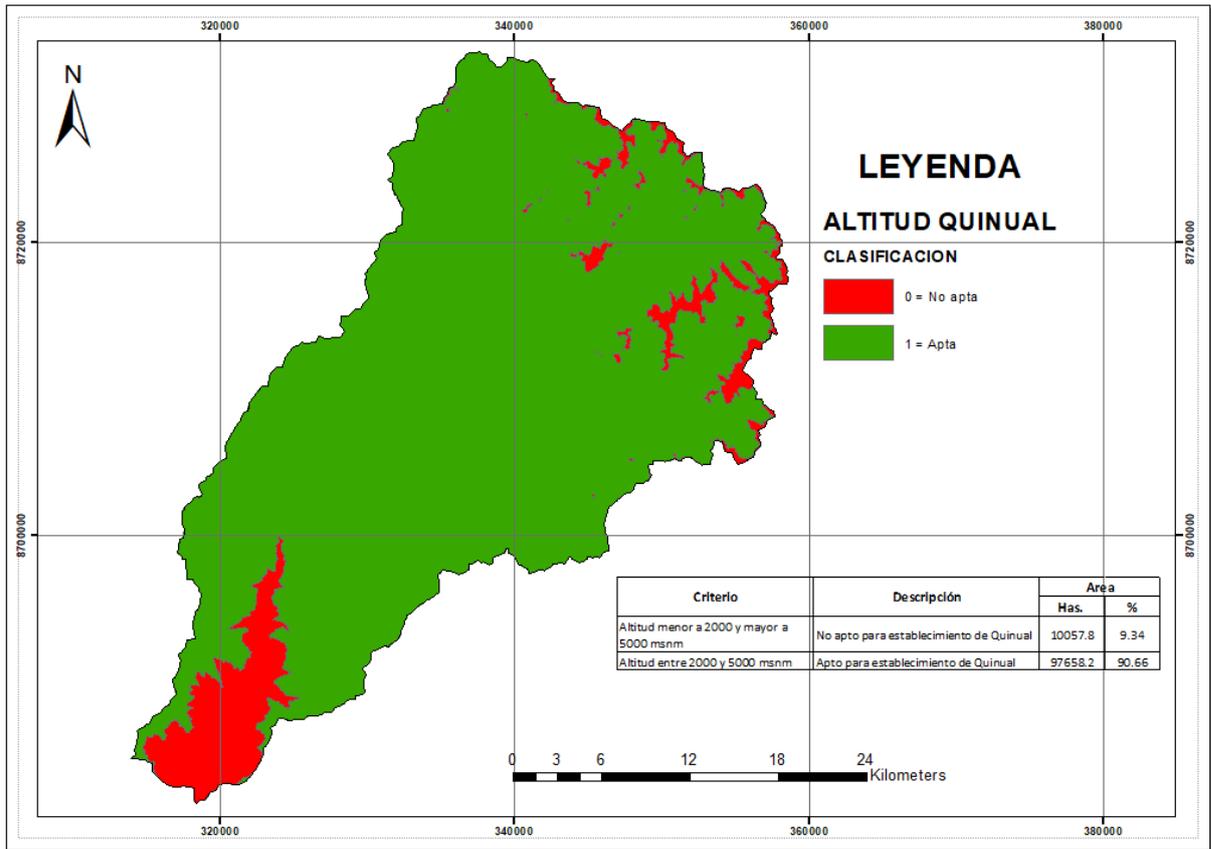


Figura 49. Mapa de rango altitudinal para el Quinual

Fuente: Elaboración propia

El Quinual al presentar un rango de distribución altitudinal amplio, tiene un área apta de 97658 has, que representa más del 90% del total de la subcuenca. Esta especie es la que puede llegar a crecer a más altitud comparada con las demás, lo cual concuerda con lo mencionado por (Lao *et al.*, 1990) que menciona que esta especie es de las pocas especies forestales de tipo arbóreo que se encuentran cerca de las nieves perpetuas.

Colle (*Buddleja coriácea*)

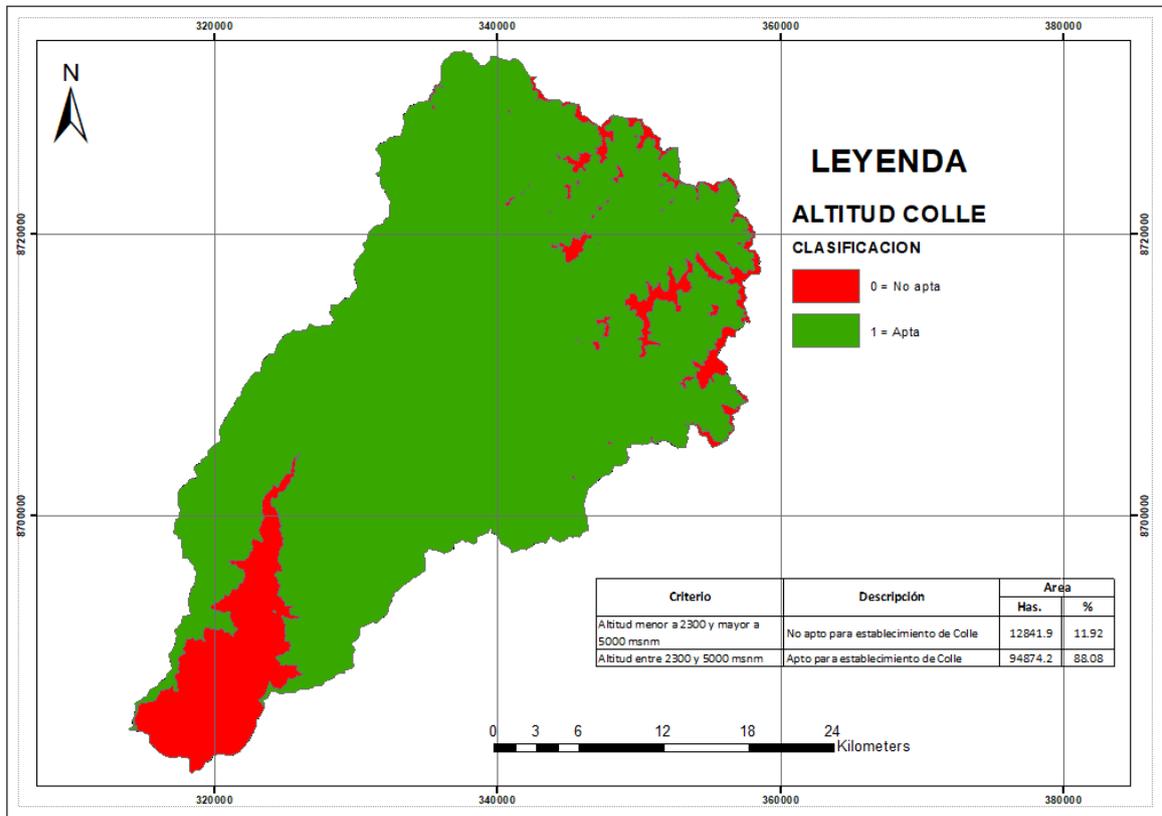


Figura 50. Mapa de rango altitudinal para el Colle

Fuente: Elaboración propia

El Colle también puede llegar a crecer a altitudes cercanas a los 5000 msnm, esta especie la podremos encontrar en la parte media y alta de la subcuenca, abarcando un área apta de 94874 has (88%) de la superficie total. Como se puede apreciar su distribución en altitud es muy similar a la del Quinual.

Lloque (*Kageneckia lanceolata*)

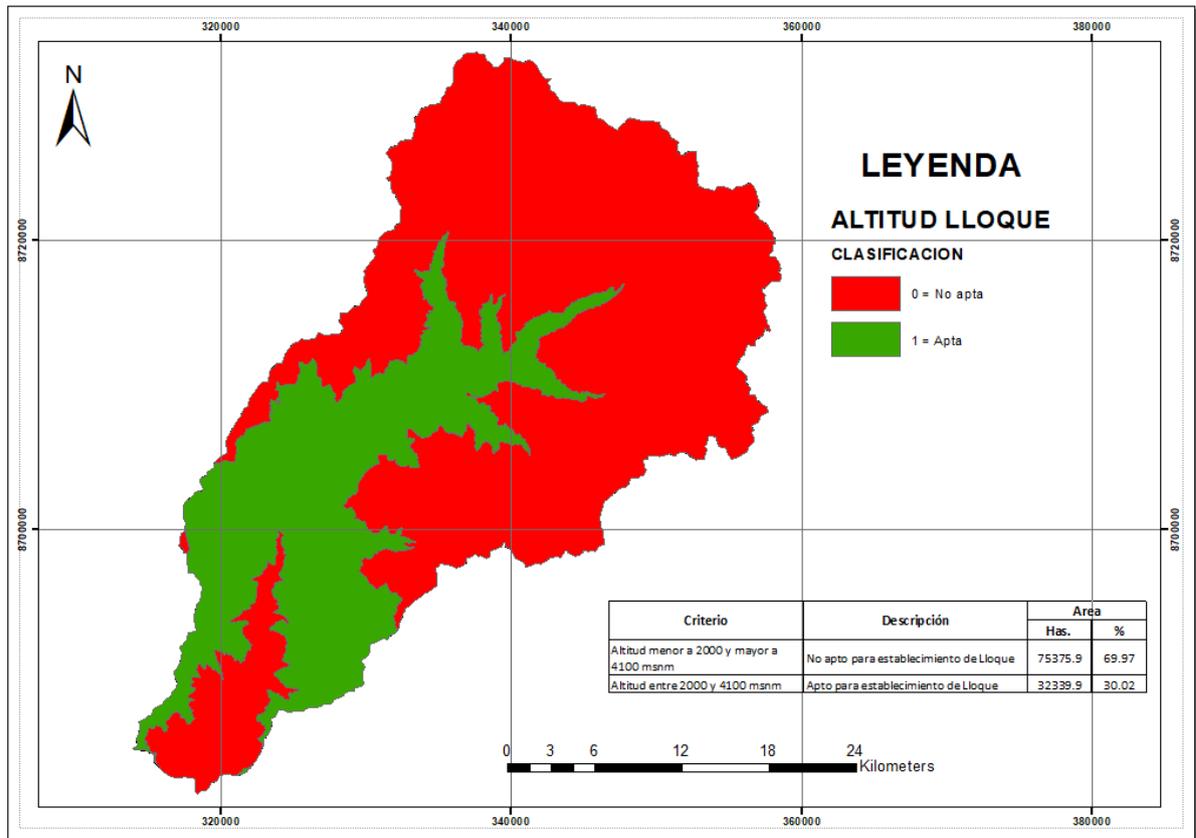


Figura 51. Mapa de rango altitudinal para el Lloque

Fuente: Elaboración propia

De las 4 especies es el Lloque la que menor área apta presenta dentro de la subcuenca con solo 32339 has (30%) del total. Su rango altitudinal va desde los 2000 a los 4000 msnm. Esta especie de porte arbustivo tiene su mayor distribución en áreas de la reserva Paisajística Nor Yauyos Cochabamba que presenta similitudes en cuanto a las variables que se presentan en este estudio.

Chachacomo (*Escallonia myrtilloides*)

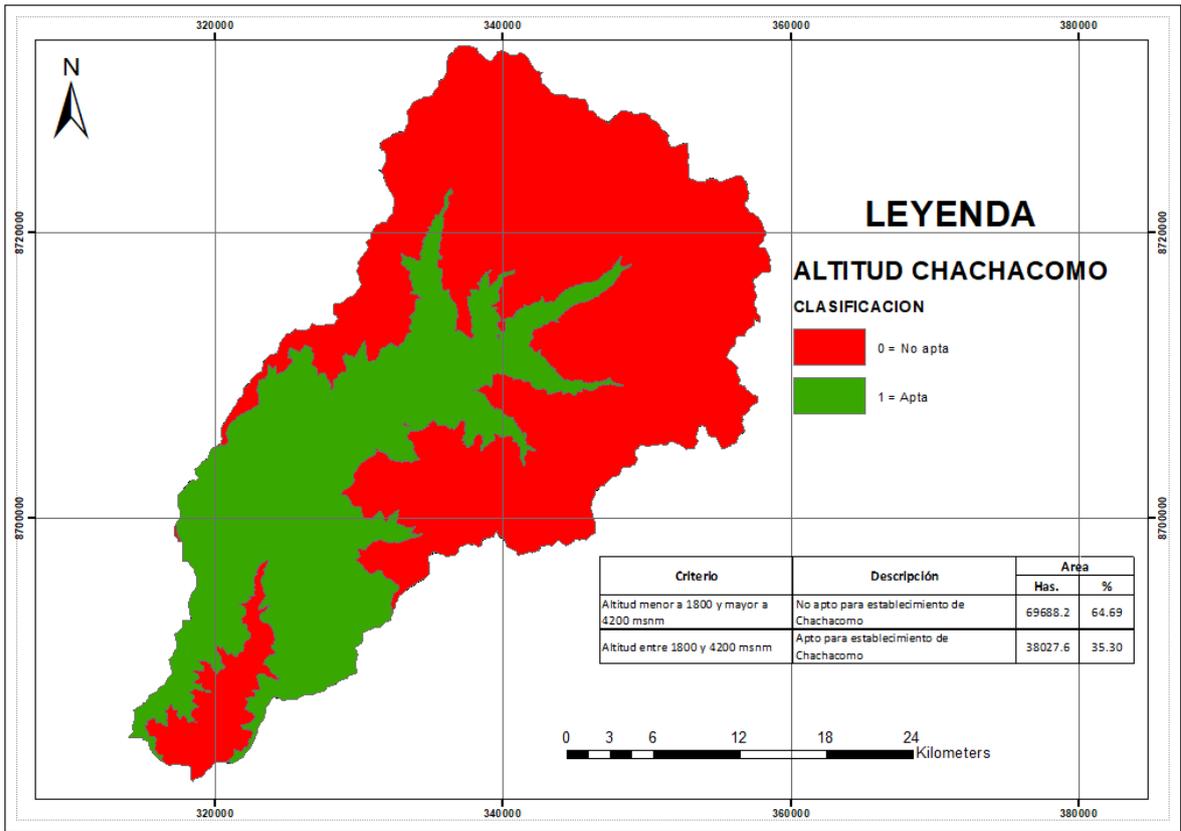


Figura 52. Mapa de rango altitudinal para el Chachacomo

Fuente: Elaboración propia

El Chachacomo tiene un requerimiento en altitud similar al Lloque, pero a diferencia de este último puede crecer a altitudes más bajas. El área apta para su crecimiento es de 38027 has lo que representa el 35 % del total del área.

4.1.6. Pendientes

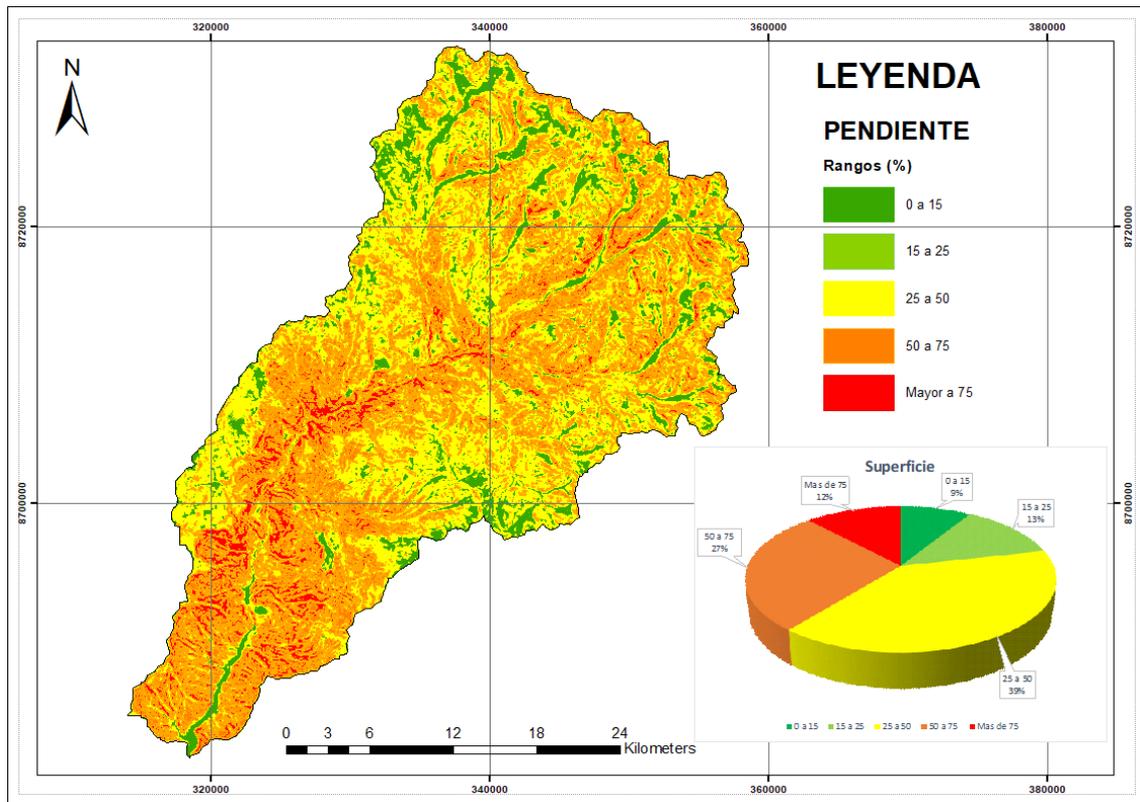


Figura 53. Mapa de rango de pendientes

Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar en la Figura 54 la mayor parte del área presenta una pendiente empinada (25 a 50%) y muy empinada (50 a 75%), abarcando entre ambos el 66% del total del área de estudio. Generalmente este tipo de pendientes son destinados a usos forestales y de protección, los cuales influenciarán en la capacidad de retención de agua y el riesgo de erosión de las áreas como menciona (Harold 1984).

A partir de este mapa se obtuvieron las pendientes aptas para cada especie a partir de la reclasificación.

Quinual (*Polylepis incana*)

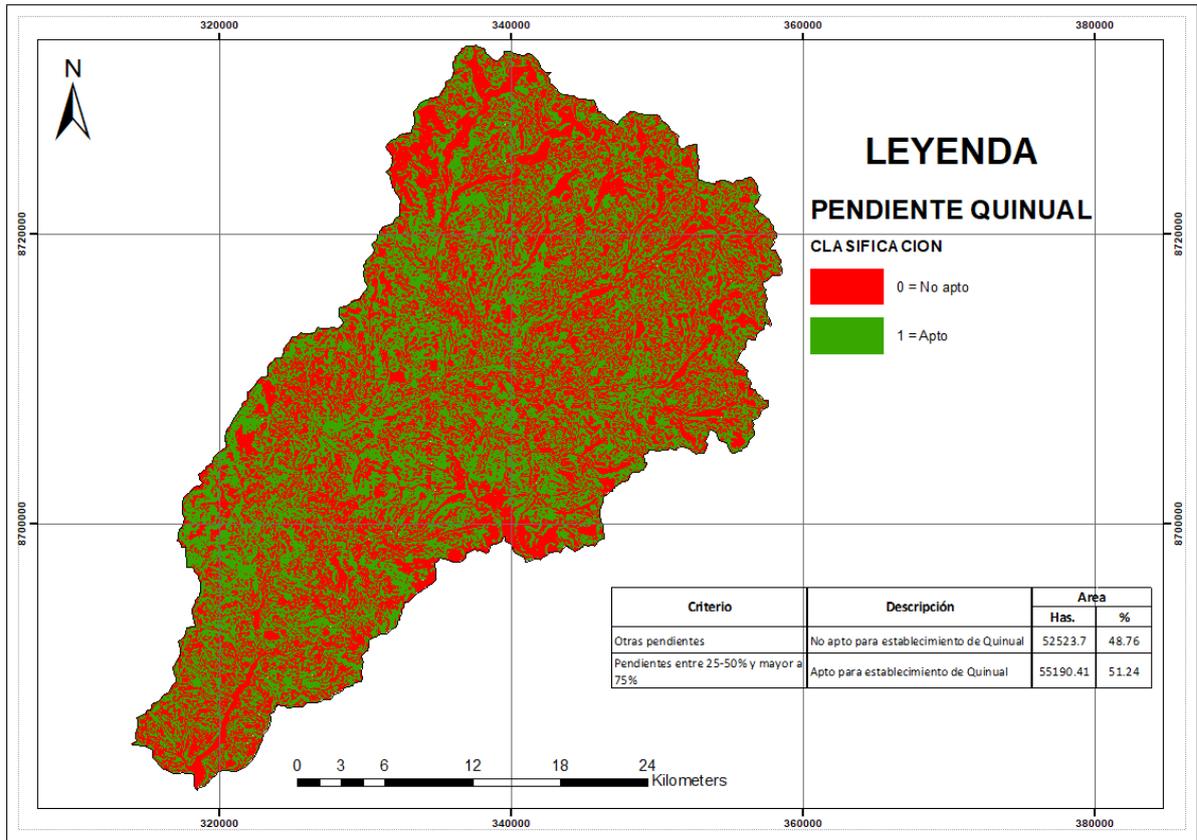


Figura 54. Zonas aptas y no aptas en pendiente para el Quinual

Fuente: Elaboración propia

Cardoso y Zanabria (2023) mencionan que el rango de pendiente óptimo para el crecimiento de esta especie va de 30 a 45%, mientras que Rohner (2023) sostiene que crece mejor en pendientes superiores a 75%, según esto la superficie apta para su establecimiento es de 55 190 has que corresponde al 51.24% del total de la subcuenca.

Estas pendientes también coinciden con lo mencionado en la memoria descriptiva de la cobertura vegetal en la parte de bosque relicto altoandino, donde mencionan que, entre otras especies, el Quinual se ubica sobre pendientes empinadas hasta escarpadas.

Colle (*Buddleja coriácea*)

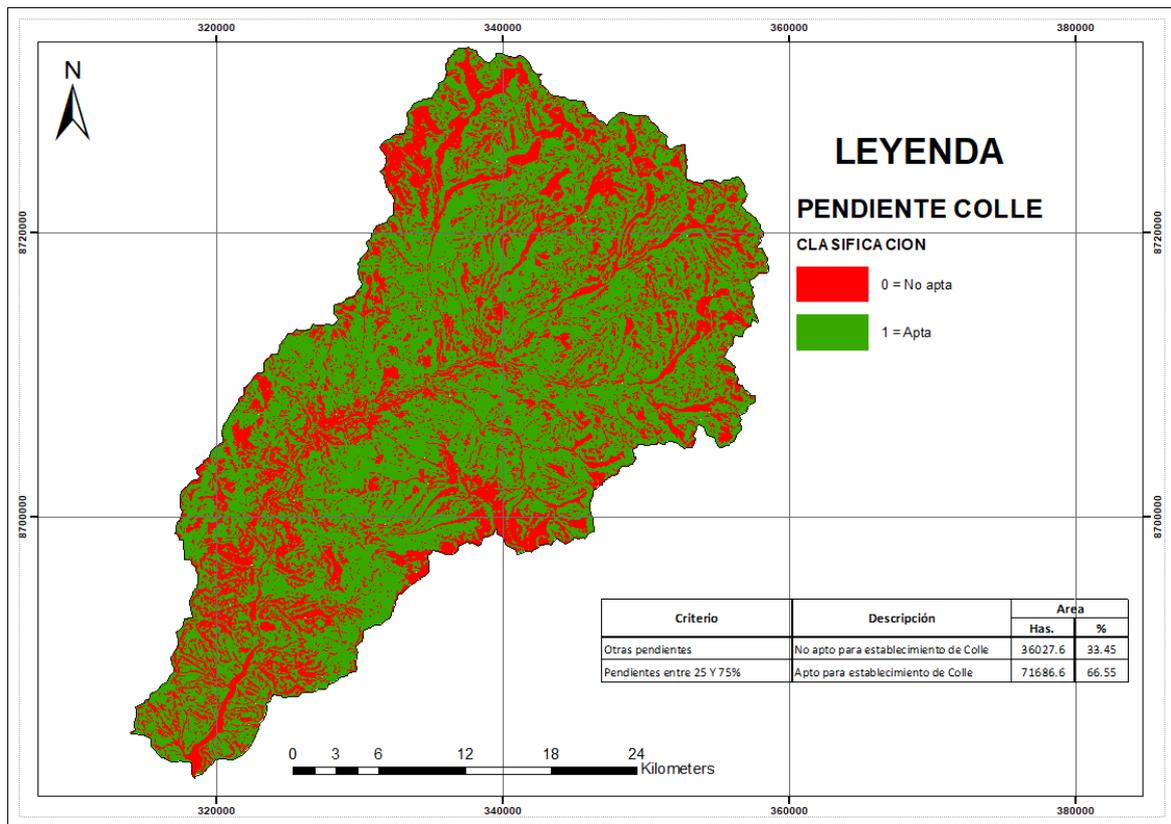


Figura 55. Zonas aptas y no aptas en pendiente para el Colle

Fuente: Elaboración propia

Cardoso y Zanabria (2023) indican que la pendiente óptima para el crecimiento de Colle esta entre 30 y 45 %, mientras que Rohner, (2023) señala un rango de pendiente superior, entre 60 a 75%, según esta información, el área apta es de 71 686 has, que representa el 66.55% del total.

Lloque (*Kageneckia lanceolata*)

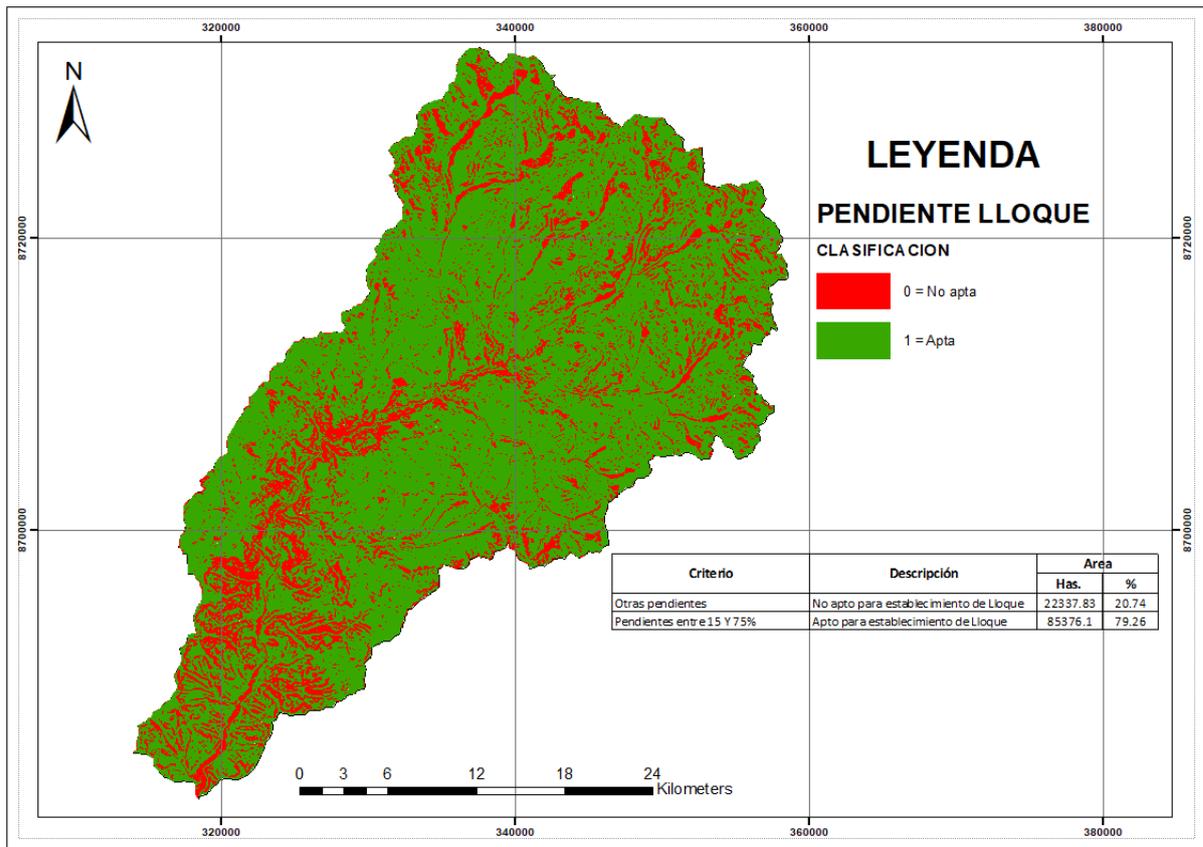


Figura 56. Zonas aptas y no aptas en pendiente para el Lloque

Fuente: Elaboración propia

El Lloque abarca mayor cantidad de área optima en pendiente ya que según lo señalado por Rohner (2023) y Cardoso y Zanabria (2023) su requerimiento en cuanto a pendiente es muy variable, ya que puede crecer desde sitios moderadamente empinados hasta muy empinados. Es por ello que el área apta obtenida es de 85376 has, representando el 79.26% del total.

Chachacomo (*Escallonia myrtilloides*)

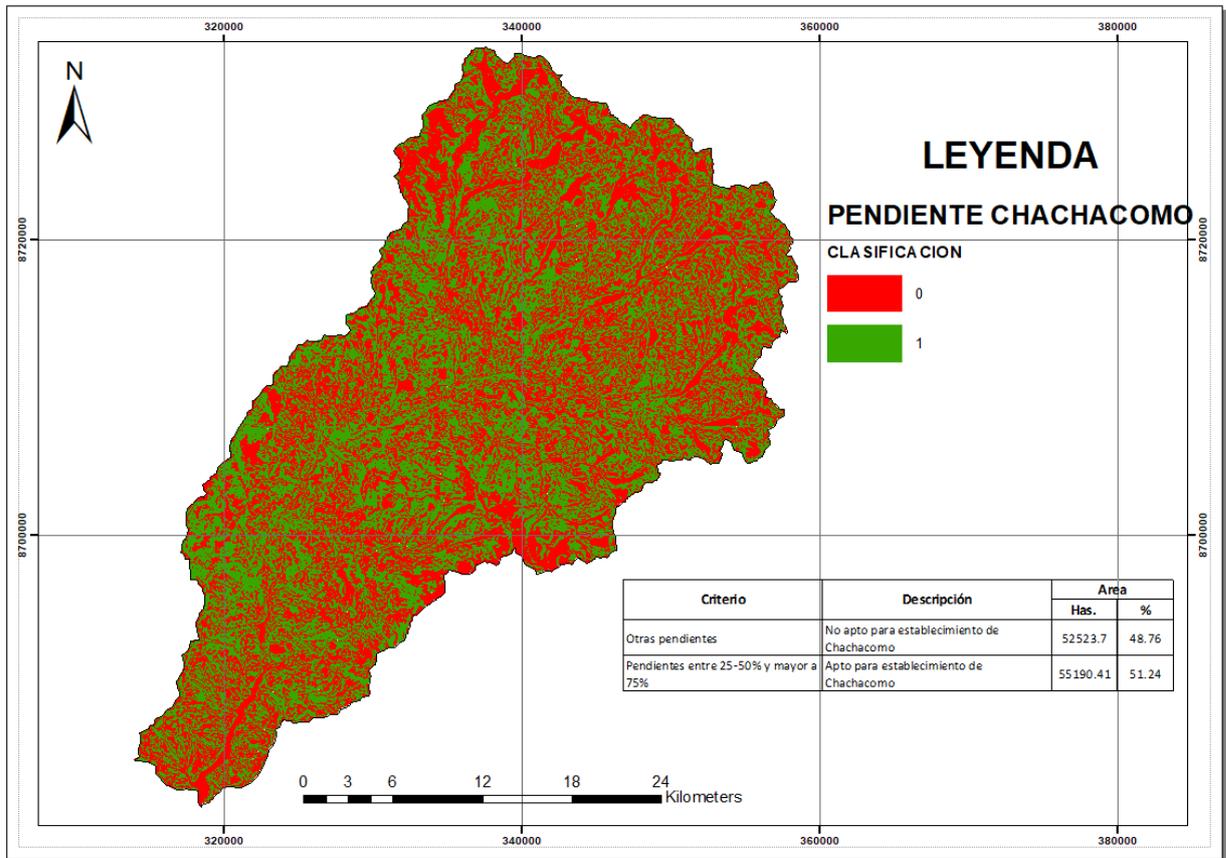


Figura 57. Zonas aptas y no aptas en pendiente para el Chachacomo

Fuente: Elaboración propia

Los requerimientos en pendiente de esta especie son iguales a la del Quinual, es por ello que el área apta disponible es de 55 190 has. Como se observa las áreas aptas en pendiente tanto para Quinual y Chachacomo, a diferencia de Lloque y Colle, no forman grandes superficies en conjunto, si no que están más fragmentadas tanto en lugares empinados como extremadamente empinados.

4.1.7. Cobertura de la tierra

La cobertura de la tierra de la subcuenca Santa Eulalia se muestra en la Tabla 5 y Figura 59, siendo el herbazal la que mayor área abarca con cerca de 40 000 hectáreas que representan el 36,8 por ciento, este tipo de cobertura corresponde al nivel 3 de la metodología *Corine Land Cover*. Las tierras desnudas con 27331 hectáreas (25,73 por ciento) ocupan el segundo lugar, estas tierras están ubicadas en la parte alta de la cuenca y también corresponden al nivel 3 de la mencionada metodología.

La vegetación arbustal ocupa 22799 hectáreas (21,17 por ciento) y está situada por debajo del herbazal y sobre la vegetación arbustiva/herbácea, este tipo de cobertura corresponde al nivel tres siendo más específico y pertenece al nivel dos de áreas con vegetación arbustivo/herbáceo.

Un tipo de cobertura con poca superficie corresponde a las áreas húmedas continentales que corresponde a los bofedales con 0,79 por ciento, esta cobertura es muy importante debido a los múltiples servicios ecosistémicos que brinda y que actualmente está siendo depredado por las actividades antrópicas pues es muy requerido como sustrato por los viveros de la capital.

También se resalta la presencia del bosque denso bajo, que consiste en bosques relictos de especies nativas, que al igual que los bofedales brindan servicios ecosistémicos y representan el 0,67 por ciento del total del área.

Además, podemos encontrar zonas urbanas que es donde se asientan los diferentes poblados que están dentro de la cuenca con un 0,09 por ciento y finalmente las áreas industriales e infraestructura con un 0,03 por ciento los cuales corresponden a infraestructuras de hidroeléctricas y mineras que trabajan en la zona.

Tabla 5. Uso de la tierra de la subcuenca Santa Eulalia

Uso de la tierra	Superficie (has)	Superficie (%)
Herbazal	39669.70	36.83
Tierras desnudas	27331.80	25.37
Arbustal	22799.80	21.17
Vegetación arbustiva/herbácea	8727.97	8.10
Áreas agrícolas heterogéneas	2928.41	2.72
Áreas arenosas naturales	1683.27	1.56
Glaciares	1597.50	1.48
Lagos y Lagunas	1194.00	1.11
Áreas Húmedas Continentales	851.89	0.79
Bosque denso bajo	717.68	0.67
Áreas urbanizadas	101.14	0.09
Áreas con vegetación herbácea y/o arbustiva	81.14	0.08
Áreas industriales e infraestructura	32.16	0.03
TOTAL	107 716.46	100.00

Fuente: Elaboración propia

A continuación, se muestra el mapa de uso de la tierra utilizando la leyenda de *Corine Land Cover*.

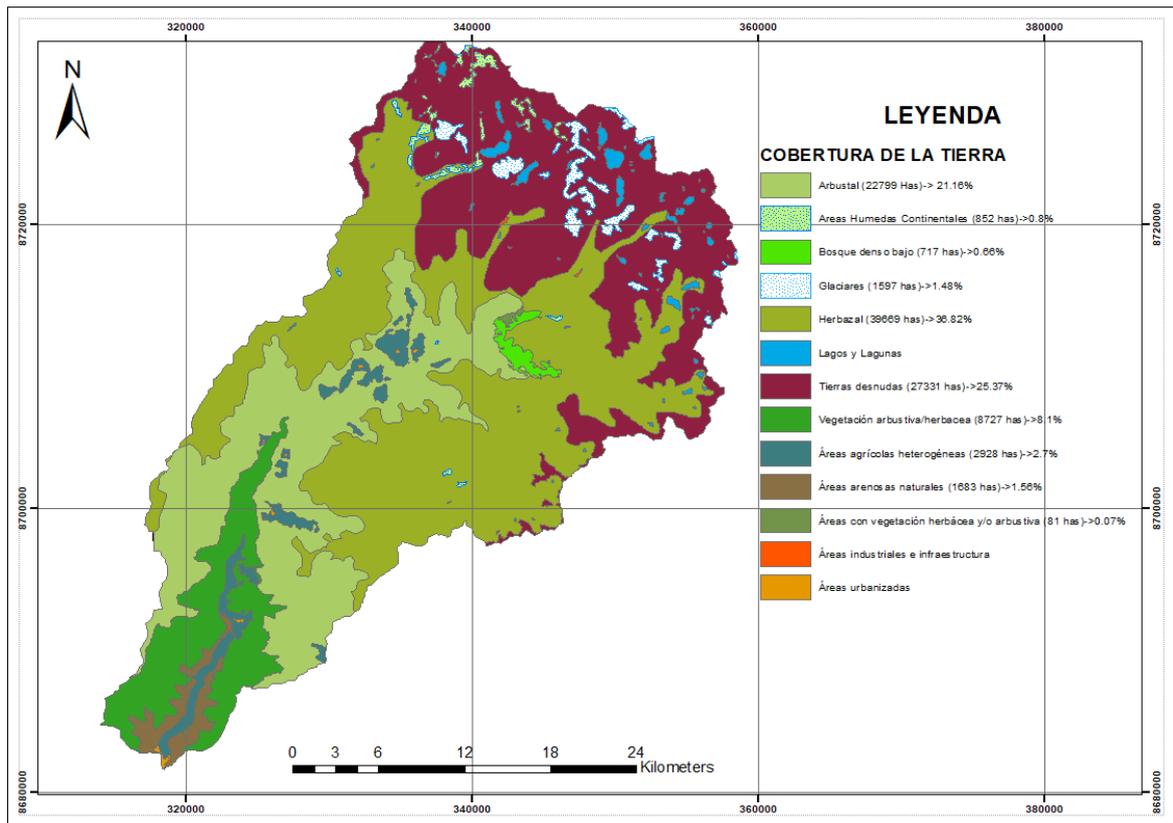


Figura 58. Mapa de cobertura de la tierra en la subcuenca Santa Eulalia

Fuente: Elaboración propia

Este mapa de cobertura de la tierra es importante ya que para el resultado final del modelamiento las áreas óptimas de las especies no pueden coincidir o superponerse a áreas que actualmente tienen un uso por los pobladores de la cuenca, en tal sentido se realizó la reclasificación de esta cobertura en zonas aptas (1), que serían: Las tierras desnudas, es decir sin ningún tipo de cobertura, las áreas con vegetación herbácea y/o arbustiva, el arbustal, el herbazal, que, si bien presentan una cobertura vegetal, también pueden ser usadas con fines de reforestación. La suma total de estas áreas arroja poco más de 98 610 hectáreas disponibles para reforestación.

4.1.8. Áreas potenciales

Como resultante de la combinación de las variables presentadas: precipitación, temperatura máxima y mínima, pH, textura, altitud, pendiente y la cobertura se obtuvieron las áreas óptimas para cada especie, las cuales se muestran de manera individual en las siguientes figuras.

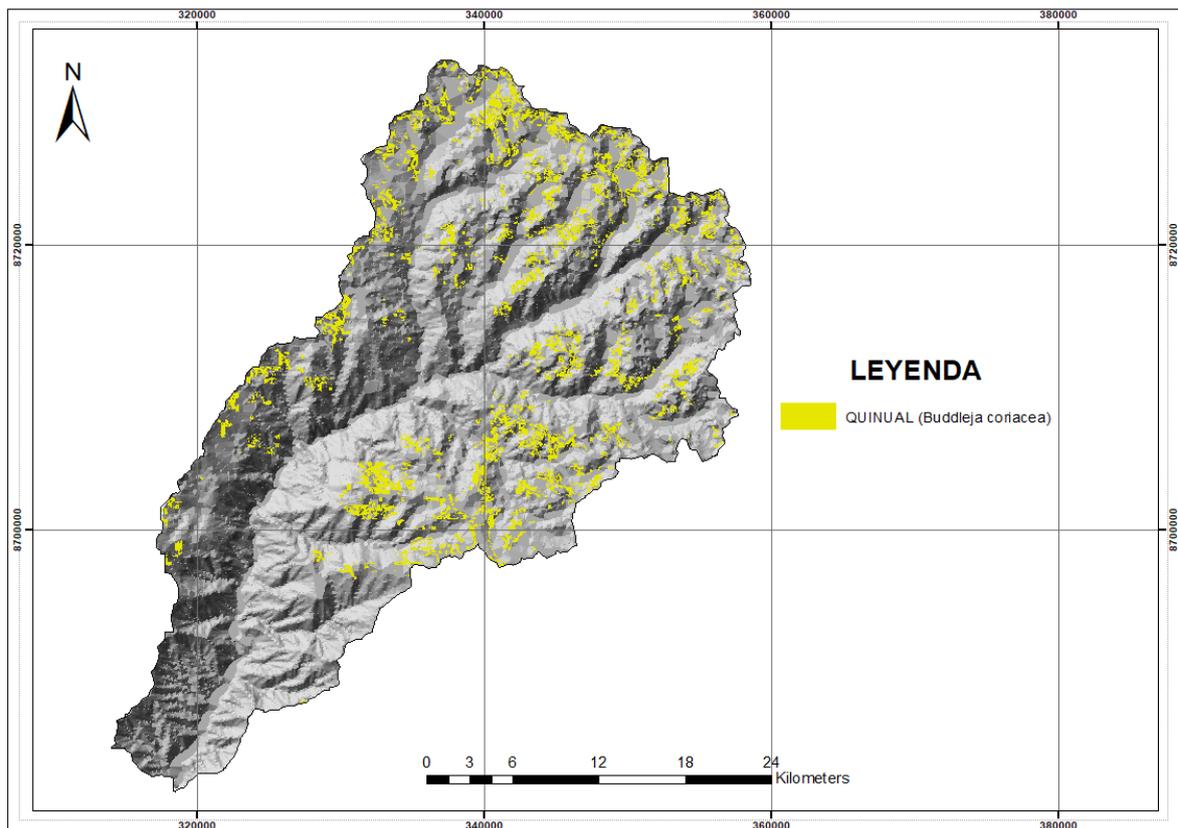


Figura 59. Áreas óptimas para reforestación con el Quinual

Fuente: Elaboración propia

Para el caso del Quinual se obtuvo un área óptima de 9152 hectáreas. Se puede observar que su distribución es amplia a lo largo de la cuenca y está segmentada conformando pequeños rodales en laderas rocosas y quebradas o matorrales como lo menciona (Kessler 2006).

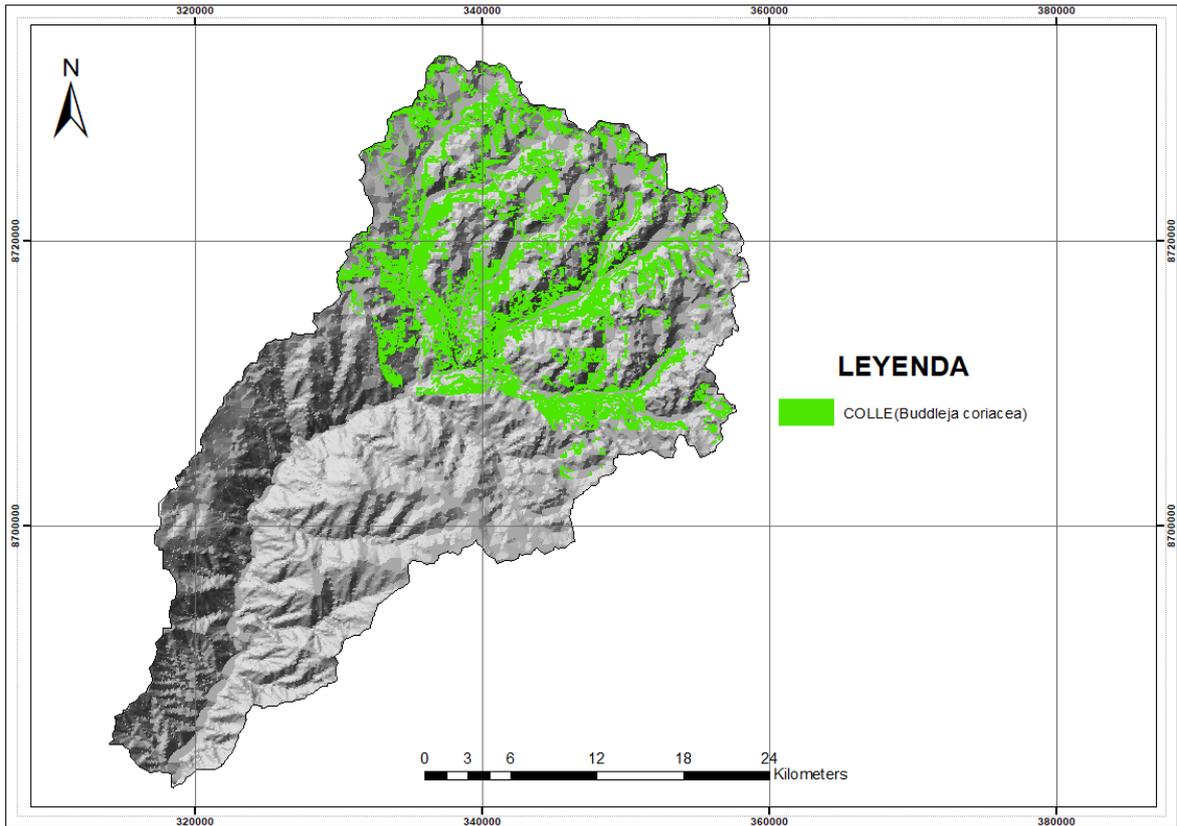


Figura 60. Áreas óptimas para reforestación con el Colle

Fuente: Elaboración propia

El Colle presenta un área óptima mayor con 19085 hectáreas y a diferencia del Quinual, esta especie presenta una distribución más concentrada. De las 4 especies esta es la que arroja la mayor superficie óptima para su establecimiento.

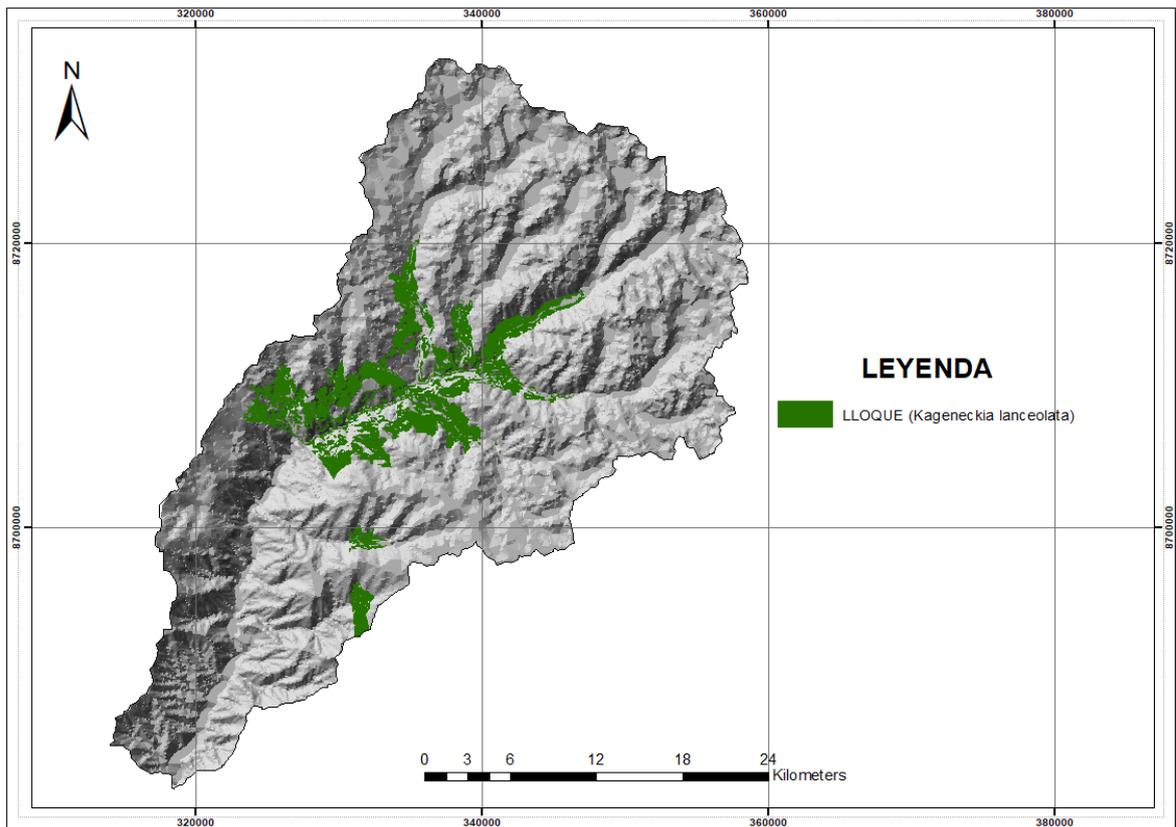


Figura 61. Áreas óptimas para reforestación con el Lloque

Fuente: Elaboración propia

El modelamiento resultante para el Lloque también muestra una distribución más concentrada en la parte media de la cuenca. La superficie óptima para esta especie fue de 8486 hectáreas. Esta especie muestra un gran potencial para su establecimiento sobre estas áreas ya que es muy utilizada en áreas geográficas con mucha similitud a la subcuenca del río Santa Eulalia, en la localidad de Alis, dentro de la Reserva Paisajística Nor Yauyos Cochabamba donde se aprecia un crecimiento sobre áreas con abundante pedregosidad superficial, mostrando sus raíces una capacidad para abrirse paso sobre superficies pedregosas como se muestra en los anexos.

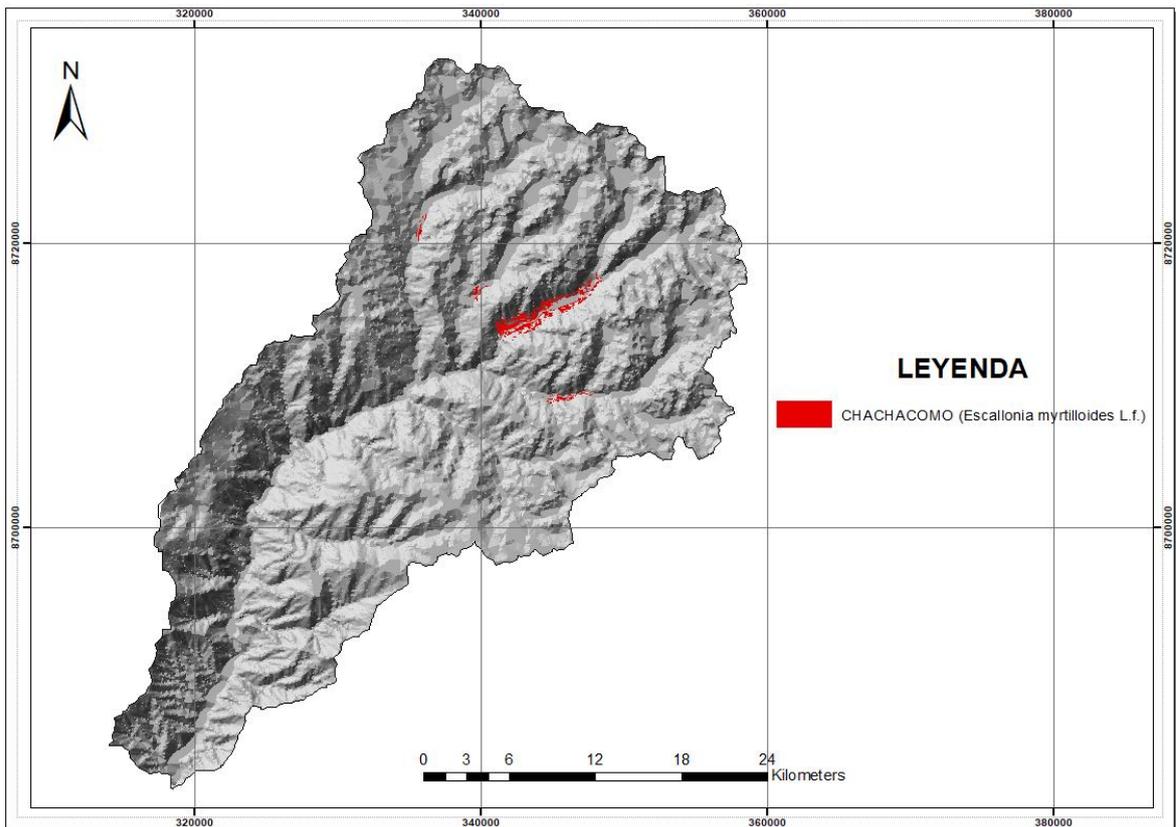


Figura 62. Áreas óptimas para reforestación con el Chachacomo

Fuente: Elaboración propia

En el caso de Chachacomo, fue la especie que menos condiciones presenta para su establecimiento dentro del área de estudio con solo 525 hectáreas, la variable que más limita su distribución es la precipitación, ya que todos los autores coinciden en que su requerimiento para su crecimiento óptimo es de más de 500 mm/año.

Posteriormente se elaboró un mapa con todas las especies la cual se presenta a continuación:

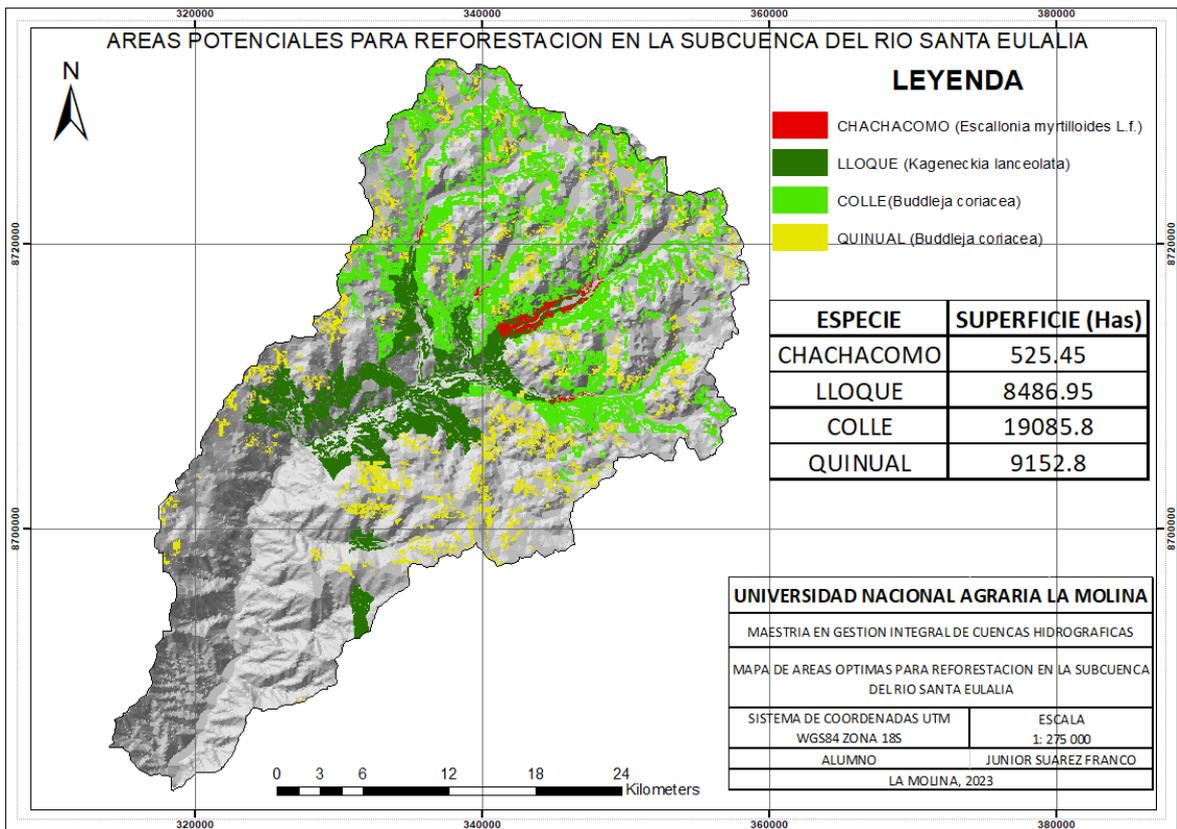


Figura 63. Áreas potenciales para reforestación en la subcuenca del río Santa Eulalia

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 64 se puede observar las áreas potenciales para el óptimo crecimiento de las especies presentadas, la suma total de esta superficie fue de 37 248 hectáreas, sin embargo, también se puede observar que existen pequeñas áreas donde se sobreponen las áreas de Chachacomo y Colle ya que presentan similitudes en sus requerimientos, siendo las limitantes más marcadas para Chachacomo la textura y pH que reducen su área potencial.

Finalmente, como una validación previa, se observa en la siguiente figura que existen áreas que, según el resultado del modelamiento, son calificadas como potenciales, sin embargo, estas áreas son zonas rocosas donde el establecimiento de estas especies no podría prosperar. La tabla 4 muestra que, según el estudio de INADE (1997), más de la mitad de la superficie de la subcuenca del río Santa Eulalia (56%) presenta una cobertura del tipo rocosa, por lo que es necesario extraer estas áreas.



Figura 64. Zonas rocosas en áreas óptimas para el Quinual

Fuente: Google Earth

La figura 65 muestra una porción del área óptima para la reforestación con el Quinual, sin embargo, se logra apreciar que son áreas rocosas que están dentro de la cobertura de la tierra categorizada como “tierras desnudas”. Áreas como estas claramente no son aptas para dicha actividad por lo que se hace necesario realizar una modificación que se verá más adelante.



Figura 65. Zonas rocosas en áreas óptimas para el Colle

Fuente: Google Earth

La figura 66 muestra que también existen zonas potenciales para el Colle que son áreas rocosas. Estas áreas según INADE (1997) están relegadas a actividades de recreación y protección de hábitat de fauna silvestre.

Para corregir este error, se utilizó una capa (*shapefile*) de Rocas que se obtuvo del trabajo realizado por el Instituto Nacional de Desarrollo (INADE).

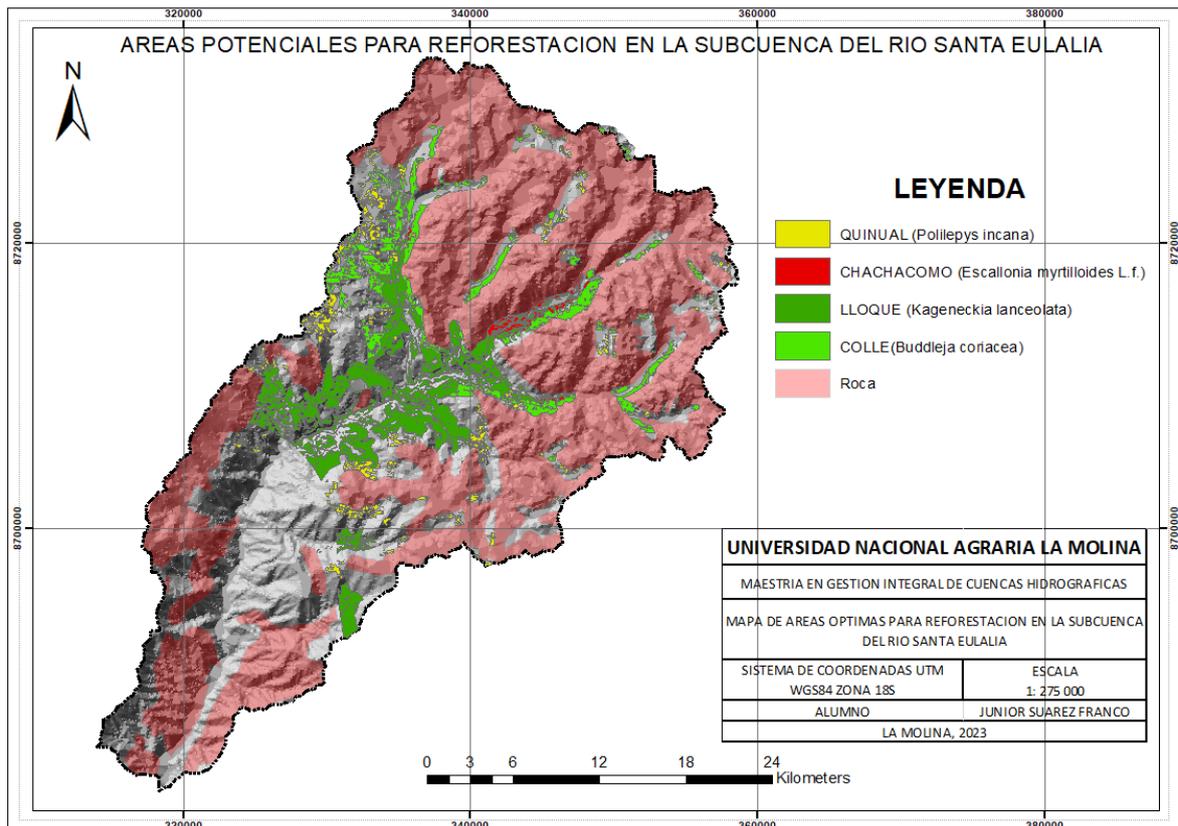


Figura 66. Áreas potenciales para reforestación en la subcuenca del río Santa Eulalia

Fuente: Elaboración propia

La figura 67 muestra la capa rocosa que, como menciona el INADE (1997), son áreas que no presentan ninguna aptitud, agrícola, forestal o pecuaria ya que presentan abundante pedregosidad superficial.

Finalmente, extrayendo las áreas potenciales que coincidían con las zonas rocosas, se obtiene el mapa final de las áreas potenciales para reforestación en la subcuenca del Río Santa Eulalia para las especies de Quinual, Colle, Lloque y Chachacomo.

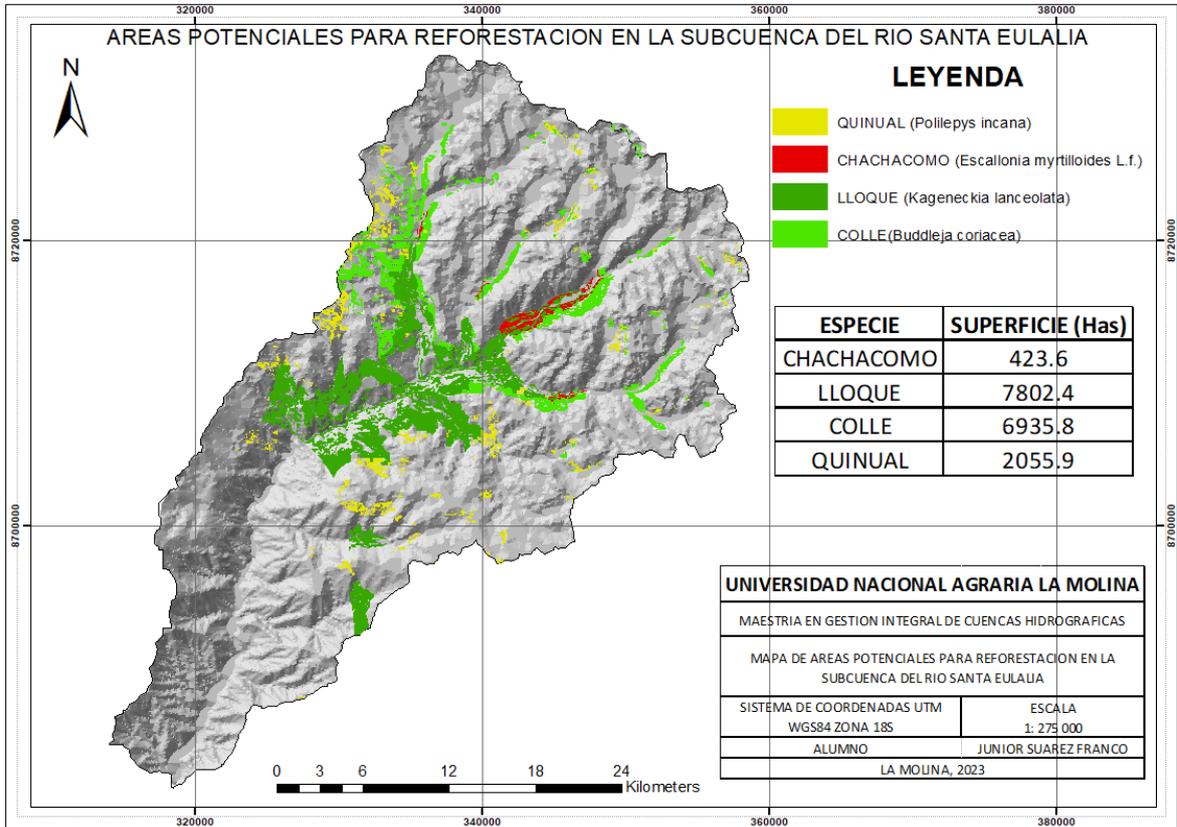


Figura 67. Áreas potenciales para reforestación en la subcuenca del río Santa Eulalia

Fuente: Elaboración propia

Como aprecia en la figura 68, luego de extraer las áreas rocosas, la superficie potencial para reforestación se redujo notablemente, sobre todo el parte superior de la subcuenca que se caracteriza por poseer la mayor cantidad de superficie de este tipo.

El área potencial para Quinual se redujo extensamente pasando de 9152 a 2055 hectáreas, esto debido a que su distribución en rango altitudinal va desde los 2000 msnm hasta los 5000 msnm, es decir áreas que se encuentran a elevadas alturas respecto al nivel del mar que se caracterizan por ser rocosas.

Mientras que el área para el Colle, se redujo de 19085 a 6935 hectáreas. Estas dos especies, el Colle y el Quinual, son las más adecuadas para ser utilizadas en la cabecera de la cuenca debido a su mayor adaptación a altitudes elevadas.

Para el caso del Lloque y Chachacomo, la reducción del área óptima no fue tan notoria como en los casos anteriores, ya que para el primero pasó de 8486 a 7802 hectáreas y para el segundo de 525 a 423 hectáreas. El Lloque es la especie que se puede utilizar para la reforestación en la parte media de la cuenca y en zonas donde la pendiente no sea tan fuerte (menor a 75%).

El Chachacomo tiene poca presencia en cuanto a zonas óptimas dentro de la subcuenca, los factores limitantes para este resultado son sus requerimientos en precipitación, textura y altitud.



Figura 68. Zonas óptimas en tierras desnudas para el Quinual y en herbazal para el Colle

Fuente: Google Earth

Se puede observar que las nuevas áreas resultantes se encuentran en las categorías de cobertura de la tierra calificadas como aptas siendo estas las tierras desnudas, con excepción de las rocas, áreas de cobertura herbácea y arbustiva que podrían ser utilizadas con fines forestales, agroforestales o silvopasturas, pues se observó que en gran parte de la cuenca existe actividad agrícola y pecuaria. El forraje utilizado para la ganadería crece de forma silvestre y su asociación con especies forestales podría ayudar a mejorar su crecimiento al generar una

simbiosis entre ambas. Asimismo, las especies recomendadas también presentan propiedades para ser utilizadas como forraje.

Finalmente se realizó una salida a campo para realizar la validación de los resultados obtenidos, en el cual se verificó para cada una de las muestras que la cobertura de la tierra corresponda a la que se obtuvo en la clasificación, además se midieron el pH y adicionalmente la conductividad eléctrica ya que como menciona Castellanos (2000) es un factor que influye en los rendimientos de los cultivos.

A continuación, se muestran los puntos de validación:

NUMERO	CODIGO	ESTE	NORTE	pH MEDIDO	pH INTERPOLADO	COBERTURA	VERIFICACION DE COBERTURA	OBSERVACION
1	L1	328313	8706407	8.71	6.40	ARBUSTAL	CORRESPONDE	
2	L2	335821	8710568	6.76	5.73	ARBUSTAL	CORRESPONDE	
3	L3	335933	8712033	8.16	7.33	ARBUSTAL	CORRESPONDE	
4	L4	335339	8719725	5.55	5.37	HERBAZAL	CORRESPONDE	
5	Q1	335413	8719824	5.95	5.38	HERBAZAL	CORRESPONDE	
6	L5CH1CO1	335640	8720389	5.96	5.47	HERBAZAL	CORRESPONDE	
7	L6CO3	341269	8712330	6.75	5.68	ARBUSTAL	CORRESPONDE	
8	Q2	341324	8712259	7.2	5.68	ARBUSTAL	CORRESPONDE	
9	L7CO4	341602	8713590	6.04	5.09	ARBUSTAL	CORRESPONDE	
10	CH2	341740	8713673	6.48	5.13	ARBUSTAL	CORRESPONDE	
11	CH3	341987	8713820	6.95	5.21	ARBUSTAL	CORRESPONDE	
12	L8CO5CH4	342877	8714177	6.59	5.36	ARBUSTAL	CORRESPONDE	
13	CO6	350313	8718627	6.19	5.00	HERBAZAL	CORRESPONDE	
14	CO8Q3	351922	8719299	5.53	5.42	HERBAZAL	CORRESPONDE	
15	CO2	339983	8711232		6.63	ARBUSTAL	NO CORRESPONDE	AREA AGRICOLA
16	L9CO6CH5	343067	8714482		5.39	ARBUSTAL	CORRESPONDE	NO SE PUDO ACCEDER
17	CO7	351627	8719154		5.25	HERBAZAL	CORRESPONDE	NO SE PUDO ACCEDER
18	CO9Q4	352374	8719771		5.78	HERBAZAL	NO CORRESPONDE	BOFEDAL
19	CO10	352778	8720437		6.20	HERBAZAL	CORRESPONDE	PROPIEDAD PRIVADA
20	Q6	353677	8720822		6.44	HERBAZAL	NO CORRESPONDE	BOFEDAL
21	Q7	353795	8720670		6.42	TIERRA DESNUDA	CORRESPONDE	ROCA

Figura 69. Puntos de Validación de pH y cobertura

Fuente: Elaboración propia

Como se puede apreciar de los 21 puntos de validación 18 corresponden a los resultados generados y solo 3 no corresponden, por lo que fueron corregidos en el mapa. En los anexos se muestran las imágenes de cada uno de los puntos validados.

Además, se midió el pH en campo con la ayuda de un pHmetro digital y se obtuvieron los valores que se muestran en la figura. Se realizó una correlación entre lo medido y el resultado producto de la interpolación con el método IDW y se encontró que el coeficiente de correlación fue de 58.6 por ciento, como se observa en la siguiente figura.

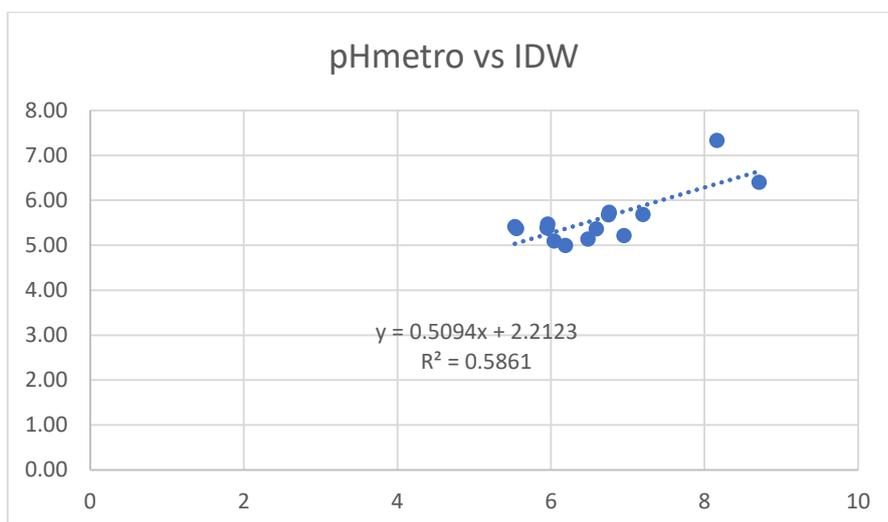


Figura 70. Correlación entre el pH medido y el interpolado

Fuente: Elaboración propia

Se puede decir que existe una buena correlación entre los valores medidos con el pHmetro digital y los valores obtenidos por la interpolación con el método IDW que fueron generados a partir de los resultados de laboratorio con lo cual se confirma que los valores de pH de la subcuenca Santa Eulalia cumplen con los requerimientos de las especies forestales.

Con respecto a la conductividad eléctrica, los resultados se pueden observar en la tabla 6.

Tabla 6. Medición de la conductividad eléctrica en el suelo

Punto	CODIGO	CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	CE (dS/m)
1	L1	107.9	0.1079
2	L2	144.8	0.1448

3	L3	92.5	0.0925
4	L4	29.9	0.0299
5	Q1	32.8	0.0328
6	L5CH1CO1	30	0.03
7	L6CO3	62.9	0.0629
8	Q2	57.3	0.0573
9	L7CO4	36.9	0.0369
10	CH2	60.8	0.0608
11	CH3	31.6	0.0316
12	L8CO5CH4	69.5	0.0695
13	CO6	35.6	0.0356
14	CO8Q3	26.4	0.0264

Fuente: Elaboración propia

Como se puede apreciar todos los valores obtenidos con un conductímetro digital están dentro del rango señalado por la USDA (1999) e incluso son más cercanos a cero, por lo que se puede decir que estos suelos no presentan ninguna restricción para el normal crecimiento de los cultivos, en este caso forestales tal como lo señala también Castellanos (2000). Se realizaron las modificaciones en el mapa delimitando las áreas que no correspondían obteniendo el siguiente mapa.

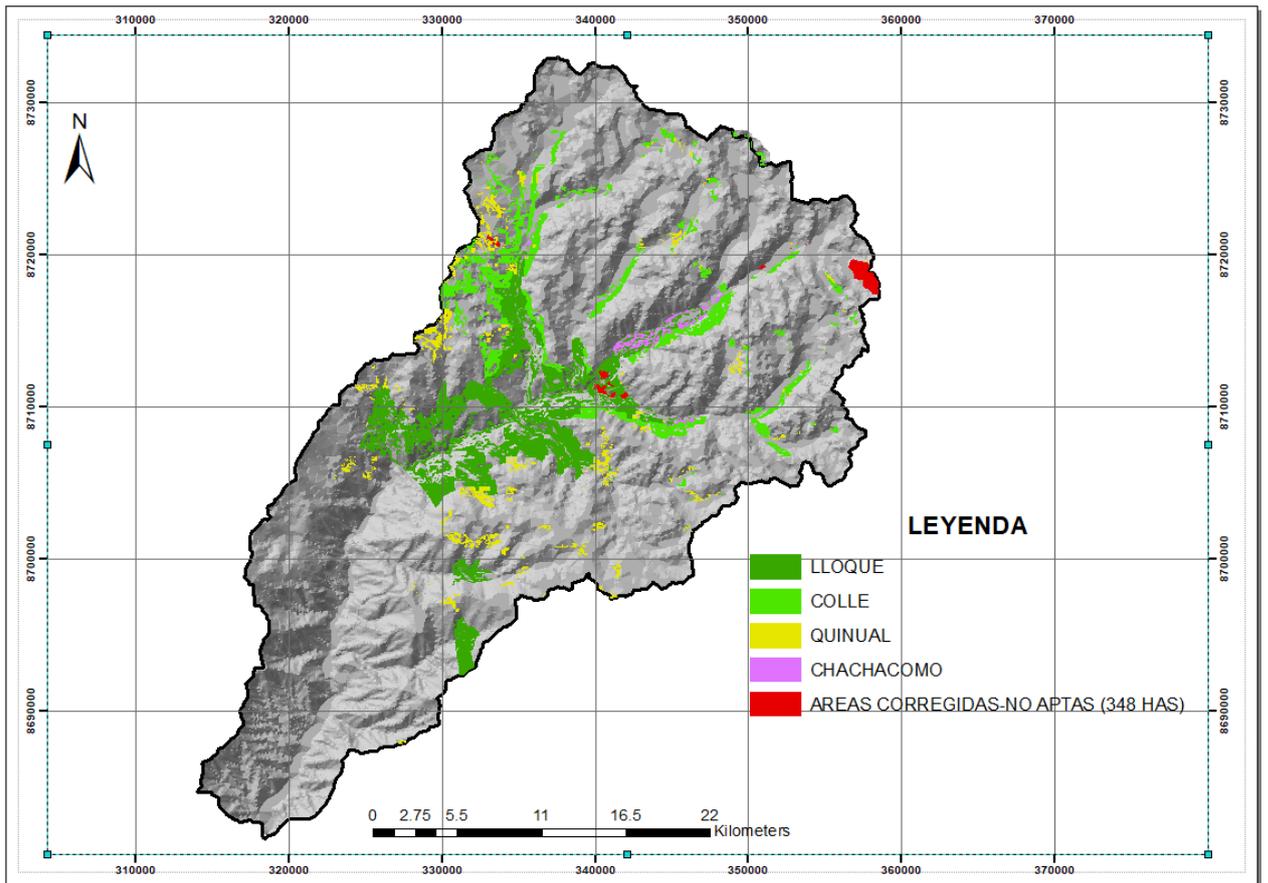


Figura 71. Mapa de áreas potenciales para reforestación con áreas corregidas (no aptas)

Fuente: Elaboración propia

Luego de la validación se realizó la corrección de las áreas que no correspondía a la clasificación de la cobertura de la tierra, por lo que se restaron 348 hectáreas al área que inicialmente se calculó. Quedando en total 16,869.7 hectáreas disponibles en la subcuenca del Río Santa Eulalia para la instalación de las especies forestales mencionadas

V. CONCLUSIONES

- Se modeló las áreas potenciales para reforestar la subcuenca Santa Eulalia utilizando como variables la precipitación, temperatura máxima y mínima, pH y textura del suelo y la altitud y pendiente del terreno.
- Se encontró que la parte alta de la subcuenca abarca 543 000 has, la parte media 426 000 has y la parte baja 107 000 has.
- Se identificó la cobertura de la tierra de la subcuenca del río Santa Eulalia a partir del mapa de cobertura vegetal utilizando la metodología *Corine Land Cover*, resaltando con mayor superficie el herbazal (36.83%) y arbustal (21.17%), y las tierras desnudas con 25.37%, dentro de las cuales se encuentran los afloramientos rocosos que no presentan aptitud forestal.
- Se propone 4 especies forestales para la reforestación, siendo estas el Quinual (*Polylepis incana*), Colle (*Buddleja coriácea*), Lloque (*Kageneckia lanceolata*) y Chachacomo (*Escallonia myrtilloides*), por ser especies nativas que son utilizadas en programas de siembra de agua debido a sus buenos resultados en la captación y regulación de la precipitación. Además de tener otros usos para la población local.
- El área de estudio presentó mayor superficie óptima para la reforestación con Lloque (7802 has), Colle (6935 has) y Quinual (2055 has) según los requerimientos ambientales encontrados para estas especies.
- La variable más limitante de las mencionadas fue la precipitación ya que por su distribución dentro de la cuenca y los requerimientos hídricos de las especies, casi la tercera parte del área deja de ser apta.

- Las temperaturas máximas y mínimas que se presentan dentro de la cuenca fueron óptimas para todas las especies propuestas.
- La otra variable que limita las zonas optimas fue la textura del suelo, excepto para el Lloque, lo cual también indica porque es la especie que mayor superficie potencial presenta.
- Al no contar con una gran cantidad de estaciones meteorológicas dentro o cercanas al área de estudio que nos brinden un resultado más exacto, los métodos de interpolación son una herramienta importante que ayuda a corregir este problema, siendo el método de interpolación IDW el más apropiado para las variables que se interpolaron (precipitación, temperatura y pH)

VI. RECOMENDACIONES

- Se recomienda realizar más trabajos o investigaciones para conocer a mayor detalle y con mayor precisión ciertas variables como el pH y la textura del suelo. Ya que esta información es muy escasa y también costosa.
- Para obtener resultados más exactos, se recomienda trabajar con unidades hidrográficas (cuencas) de menor superficie, ya que los análisis de las muestras de ciertas variables, como el pH y textura, serán menos costosas y más exactas.
- Es necesario realizar más investigaciones sobre los requerimientos ambientales de las especies forestales, ya que esta información es muy limitada y que generalmente se menciona el rango altitudinal al que se puede encontrarlos.
- Así mismo, será necesario realizar más trabajos sobre cómo afectará el cambio climático en la distribución de estas especies y otras más, así como su adaptación en el tiempo a otros espacios físicos.
- Para estudios más detallados y con mayor especialización, se recomienda utilizar una tecnología más acorde para reconocer, por ejemplo, los tipos de cobertura de la tierra utilizando drones, sobre todo en áreas de difícil acceso.
- Las actividades de forestación que se realizan a nivel nacional, deberían tomar en cuenta como mínimo estas variables (precipitación, temperatura, pH, textura, altitud y pendiente) para la selección de sitios para el establecimiento de las especies forestales y más aún si son con fines de producción.
- Se recomienda tomar en cuenta en el modelamiento la parte social, ya que para la ejecución de los proyectos este factor es determinante para su viabilidad y éxito.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alegre, J. C., & Rao, M. R. (1996). Soil and water conservation by contour hedging in the humid tropics of Peru. *Agriculture Ecosystems & Environment* , 17-25.
- ANA. (2010). *Estudio Hidrológico y Ubicación de la Red de Estaciones Hidrométricas en la Cuenca del Río Rímac* . Lima.
- ANA. (s. f.). *Autoridad Nacional del Agua*. Obtenido de Autoridad Nacional del Agua: <https://www.ana.gob.pe/portal/gestion-del-conocimiento-girh/agua-y-poblacion>
- AQUAFONDO. (2017). Áreas Potenciales para el Desarrollo de Proyectos de Infraestructura Verde en las Cuencas del Chirilu. Perú: AQUAFONDO.
- Arcos, M. E. (Diciembre de 2010). Influencia de la cobertura vegetal en la capacidad de infiltración de agua en suelos de páramo. Quito, Ecuador.
- Arica, D. (2003). Beneficios del sistema agroforestal de la Comunidad Campesina del Antacusi. Lima, Perú.
- Asner *et al.*, G. P. (2017). Scale dependence of canopy trait distributions along a tropical forest elevation gradient. *New Phytologist*, 973-988.
- Asner, G., & Martin, R. (2016). Convergent elevation trends in canopy chemical traits of tropical forests. *Global Change Biology*, 2216-2227.
- Ataroff, M., & Fermin, R. (2000). Deforestation Impact on Water Dynamics in a Venezuelan Andean Cloud Forest. *Journal of the Human Environment*.

- Balvanera, P. (2012). Los servicios ecosistémicos que ofrecen los bosques tropicales. *Ecosistemas*, 136-147.
- Barrantes, G. (2006). Valoración económica de la oferta de agua como un servicio ambiental estratégico. *Ecology and Conservation of Neotropical Montane Oak Forests*.
- Bazán, R. (2017). Manual de procedimientos de los análisis de suelos y agua con fines de riego. Lima, Perú: Instituto Nacional de Innovación Agraria - INIA.
- Beláustegui, S. (1999). *Pendientes del Terreno y Fundamentos del Caudal Máximo No Erosivo*. Buenos Aires, Argentina.
- Boyd, J., & Banzhaf, S. (2007). What are ecosystem services? The need for standardized environmental accounting units. *ScienceDirect*, 616-626.
- Calder, R., & Bruce, A. (2006). Forests and Floods: Moving to an Evidence-based Approach to Watershed and Integrated Flood Management. *Water International*, 87-99.
- Cardoso, S., & Zanabria, R. (2023). Encuesta para recolección de datos sobre requerimientos ecológicos de especies forestales. Lima.
- Carvalho *et al.*, C. (2014). Hydrological services and the role of forests: Conceptualization and indicator-based analysis with an illustration at a regional scale.
- Castellanos, J. (2000). *Interpretación de Análisis de Suelos y Aguas*. México.
- Célleri, R. (Enero de 2009). Servicios ambientales para la conservación de los recursos hídricos: lecciones desde los Andes. *Producto 1: Estado del conocimiento técnico científico sobre los servicios ambientales hidrológicos generados en los Andes*. Lima.
- Clark *et al.*, D. (1995). Edaphic and Human Effects on Landscape-Scale Distributions of Tropical Rain Forest Palms. *Ecology*, 2581-2594.

- Delpero, J. A. (2023). Manejo de propiedades físicas del suelo para recuperar huertos de palto (*Persea americana* Mill.) en estado de decaimiento en Chincha. Lima, Perú.
- Di Gregorio, A. (2005). Sistema de Clasificación de la Cobertura de la Tierra (LCCS). Conceptos de Clasificación y Manual de Usuario. *Environment and Natural Resources Services Series*, 208.
- Echavarría *et al.*, M. (2015). *Infraestructura Verde en el Sector de Agua Potable en América Latina y el Caribe: Tendencias, Retos y Oportunidades*.
- Echevarría, M., & Zucchetti, A. (2008). Estudio de prefactibilidad sobre la posible creación de un fidecomiso para la protección integral del agua y los ríos de Lima y Callao como medida de adaptación del cambio climático. Perú.
- FAO. (2009). Los bosques y el agua. *Revista Internacional de silvicultura e industrias forestales*.
- Fjeldsa *et al.*, J. (1996). *Conserving the biological diversity of Polylepis woodlands of the highland of Peru and Bolivia : a contribution to sustainable natural resource management in the Andes*. Nordeco, Copenhagen, Denmark,.
- Givnish, T. (1999). On the causes of gradients in tropical tree diversity. *Journal of Ecology* 87, págs. 193-210.
- Gonzales, G. J. (2015). Caracterización de la infiltración en bosques plantados con *Polylepis* spp., de 11 y 29 años, parque nacional Huascarán, quebrada Quilcayhuanca, Huaraz, Ancash. Lima, Perú.
- Grubb, P. (1971). Interpretation of the 'Massenerhebung' Effect on Tropical Mountains. *Nature*, 44-45.
- Harold, H. (1984). *Introducción a la biología forestal*. Mexico: AGT.

- Henríquez, C., & Cabalceta, G. (1999). *Guía práctica para el estudio introductorio de los suelos con un enfoque agrícola*. San José, Costa Rica: Asociación costarricense de la ciencia del suelo.
- Hoch, G., & Korner, C. (2005). Growth, demography and carbon relations of *Polylepis* trees at the world's highest treeline. *Functional Ecology*, 941-951.
- Holder, C. (2004). Rainfall interception and fog precipitation in a tropical montane cloud forest of Guatemala. Guatemala.
- Holdridge, L. (2000). *Ecología basada en zonas de vida*. San José, Costa Rica: IICA.
- Huwasquiche, J., & Kómetter, R. (Agosto de 2017). El aporte de los saberes comunales andinos en la utilización de los bienes y servicios ecosistémicos . *Estudio de la Mancomunidad Saywite Choquequirao Ampay en Apurímac, Perú*. Perú.
- Ibañez et al., A. (2011). *La pendiente del terreno*. Valencia.
- IDEAM. (1997). Geosistemas de Alta Montaña Colombiana. *Bogotá: Universidad Nacional de Colombia*, 403.
- IDEAM, IGAC Y CORMAGDALENA. (2008). Mapa de Cobertura de la Tierra Cuenca Magdalena-Cauca. *Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, Instituto Geográfico Agustín Codazzi y Corporación Autónoma Regional del río Magdalena, Bogotá*, 200.
- Idme, R. (2022). Especies nativas Queñua y Colle en la conservación de suelos las zanjas de infiltración en la microcuenca Ñapa-Rosaspata-provincia de Huancané 2021. Puno, Perú.
- INEI. (2018). *Instituto Nacional de Estadística e Informática*. Obtenido de Instituto Nacional de Estadística e Informática: <https://www.inei.gov.pe/prensa/noticias/poblacion-del-peru-totalizo-31-millones-237-mil-385-personas-al-2017-10817/>

- INADE. (1997). *Instituto Nacional de Desarrollo*. Plan de Manejo y Estudios de Factibilidad del Programa Ambiental de la Cuenca del Río Rímac. Lima. Perú.
- Kessler, M. (2006). Bosques de Polylepis. *Botánica Económica de los Andes Centrales*, 110-120.
- Kómetter, R., & Gálmez, V. (Agosto de 2017). La restauración de bosques andinos y sus vínculos con el agua. Orientaciones para una comunidad campesina de Apurímac. Perú.
- Landell-Mills, N., & Porras, I. (2002). *¿Bala de plata u oro de tontos?* Londres.
- Lao *et al.*, R. (1990). Información preliminar de la ecología, dendrología y distribución geográfica de las especies del genero polylepis en el Perú. *Espacio y Desarrollo*, 47-62.
- León *et al.*, J. D. (2010). Distribución del Agua Lluvia en Tres Bosques Altoandinos de la Cordillera Central de Antioquia, Colombia. *Revista Facultad Nacional de Agronomía* -, 19.
- Ley de mecanismos de retribución por servicios ecosistémicos. (2014). *Ley N° Ley de mecanismos de retribución por servicios ecosistémicos*. Lima.
- Ley Forestal y de Fauna Silvestre. (2011). *Ley N° 29763 Ley Forestal y de Fauna Silvestre*. Lima.
- Llerena *et al.*, C. (2007). Plantaciones forestales, agua y gestión de Cuencias. Lima.
- Llerena *et al.*, C. (2017). Chapter 9. Forest Management and Water in Peru. En I. H. Sediment, *Forest management and the impact on water resources: a review of 13 countries* (págs. 129 - 148). United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization.

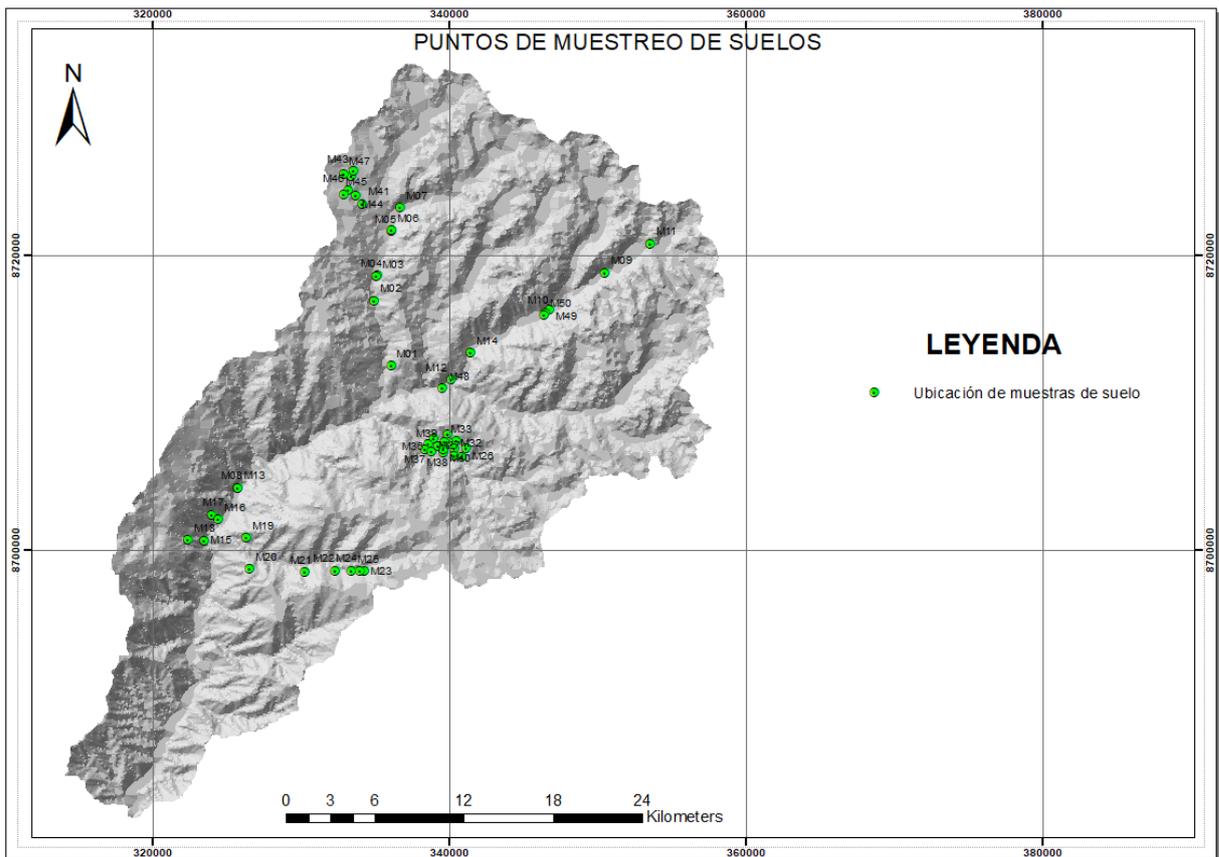
- Llerena, C., & Yalle, S. (2014). Los servicios ecosistémicos en el Perú. *Xilema Vol. 27*, 63.
- Louman *et al.*, B. (2001). *Silvicultura de bosques latifoliados húmedos con énfasis en América Central*. Costa Rica, Costa Rica: CATIE, Turrialba.
- Manco, R. B., & Paucar, J. O. (2015). Propuesta de estrategias para la gestión integrada de los recurso hídricos en la unidad hidrográfica Santa Eulalia. Lima, Perú.
- Mendoza, W., & Cano, A. (2011). Diversidad. *Revista Perú Biol. 18(2) Facultad de Ciencias Biológicas UNMSM*, 197 - 200.
- MINAM. (2015). *Mapa nacional de cobertura vegetal : memoria descriptiva*. Lima.
- Muñoz *et al.*, J. (2015). Áreas Potenciales para Establecer Plantaciones Comerciales de Pino en la Sierra Purhépecha, Michoacán. Michoacán: Foresta Veracruzana.
- Muñoz, I. (2011). Desigualdades en la distribución del agua de riego. El caso del Vallo de Ica. Lima: Fondo Editorial de la Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Murga *et al.*, H. (2021). Gradiente altitudinal y su influencia en las características edafoclimáticas de los bosques tropicales. *Madera y Bosques* .
- Neary *et al.*, D. (2009). Linkages between forest soils and water quality and quantity. Estados Unidos.
- Observatorio del Agua Chillón Rímac Lurín. (2019). *Diagnóstico Inicial para el Plan de Gestión de Recursos Hídrico de las cuencas Chillón, Rímac, Lurín y Chilca*. Lima, Perú.
- Ochoa-Tocachi *et al.*, B. (2016). Impactos del uso del suelo sobre la respuesta hidrológica de cuencas andinas.

- Ortega *et al.*, R. (Mayo de 2002). Monitoreo ambiental en los bosques de niebla: cuantificación de la precipitación oculta en bosques sub-andinos y andinos. Congreso Mundial de Páramos (II). Paipa, Colombia.
- Paredes, A., & Carlos, G. (Diciembre de 2006). Recarga de acuíferos desde el Ordenamiento Territorial para reducir la vulnerabilidad frente a la sequía. Lima, Perú.
- Pizarro *et al.*, R. (2005). Influencia de las masas boscosas en el régimen hídrico de una cuenca semiárida, Chile. *BOSQUE*, 77-91.
- Rau, P. (2012). "Zonificación de áreas con aptitud forestal y asistido por sistemas de información geográfica en la provincia de Tarma - Junín". Huancayo, Perú.
- Reglamento de clasificación de tierras por su capacidad de uso mayor. (2011).
- Reynel, C., & León, J. (1990). Árboles y arbustos andinos para agroforestería y conservación de suelos. Lima, Perú: Ministerio de Agricultura. Dirección General de Forestal y Fauna.
- Rohner, C. (2023). Encuesta para recolección de datos sobre requerimientos ecológicos de especies forestales. Lima.
- Salazar, J. N. (2015). Análisis multitemporal de la cobertura vegetal de la Microcuenca del río Pisque y su incidencia en la producción de agua, en la Provincia de Imbabura. Ibarra, Ecuador.
- Salinas, E. (2011). Evaluación preliminar de la aptitud forestal – Subcuenca del Shullcas, Microcuenca de Yuraccyacu, Comunidad Andina - Secretaria General, Ministerio del Ambiente. PRAA. Huancayo.
- Sanchez *et al.*, D. A. (2015). Efectos del Uso del Suelo en las Ppropiedades Edáficas y la Escorrentía Superficial en una Cuenca de la Orinoquia Colombiana. Colombia.

- Sánchez, P. A. (1981). *Suelos del trópico características y manejo*. San José, Costa Rica: IICA.
- Segura *et al.*, O. (Febrero de 2002). Parámetros para la valoración del servicio ambiental hídrico brindado por los bosques y plantaciones de Costa Rica. Costa Rica.
- SENAMHI. (2009). *Escenarios Climáticos en el Perú para el año 2030*. Lima, Perú.
- SENAMHI. (2016). Vulnerabilidad Climática de los Recursos Hídricos en las Cuencas de los Ríos Chillón, Rímac, Lurín y Parte Alta del Mantaro . *Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú*, 250.
- Téllez, P., & Boshell, J. F. (2005). Flujos de Agua a Través de Bosques de Diferentes Edades en la Amazonía Colombiana. Bogotá, Colombia.
- Terra *et al.*, M. (October de 2015). nfluência topo-edafo-climática na vegetação de um fragmento de Mata Atlântica na Serra da Mantiqueira, MG. *Ambiente e Agua - An Interdisciplinary Journal of Applied Science*.
- Tobón, C. (2009). Los bosques andinos y el agua. *Serie investigación y sistematización #4. Programa Regional para la Gestión Social de Ecosistemas Forestales Andinos ECOBONA*. Quito: La Caracola.
- USDA. (Agosto de 1999). Guía para la evaluación de la calidad y salud del suelo.
- Vetaas, O. R., & Chaudhary, R. P. (January de 1998). Scale and species-environment relationships in a central Himalayan oak forest, Nepal. *Plant Ecology*, 67-76.
- Walter, H. (1979). *Vegetation of the Earth and ecological systems of the Geo-biospHere*. Springer. 88.

VIII. ANEXOS

Anexo 1. Puntos de muestreo de suelos



Anexo 2. Validación y mediciones del área óptima para Lloque (L1)



Anexo 3. Validación y mediciones del área óptima para Lloque (L2)



Anexo 4. Validación y mediciones del área óptima para Lloque (L3)



Anexo 5. Validación y mediciones del área óptima para Lloque (L4)



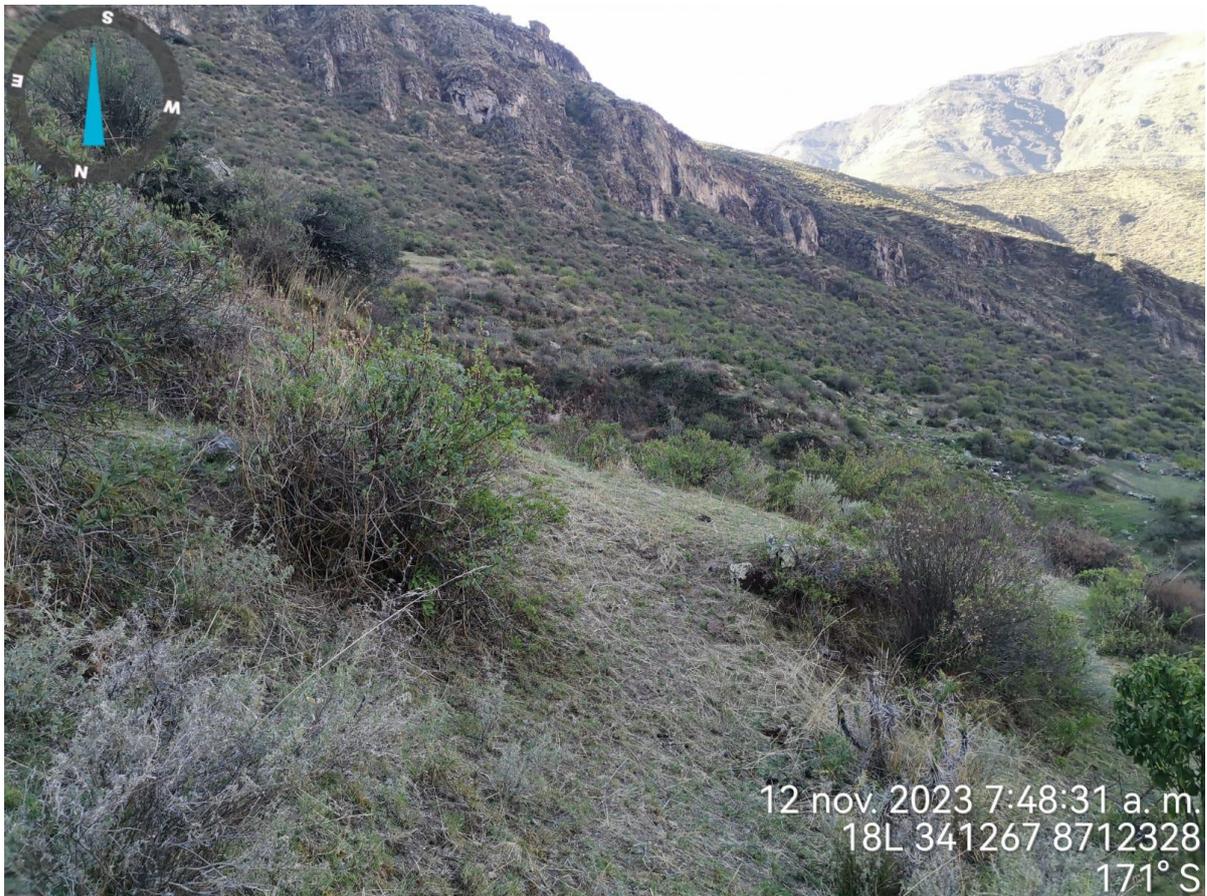
Anexo 6. Validación y mediciones del área óptima para Quinual (Q1)



Anexo 7. Validación y mediciones del área óptima para Lloque, Chachacomo y Colle (L5CH1C01)



Anexo 8. Validación y mediciones del área óptima para Lloque y Colle (L6CO3)



Anexo 9. Validación y mediciones del área óptima para Quinual (Q2)



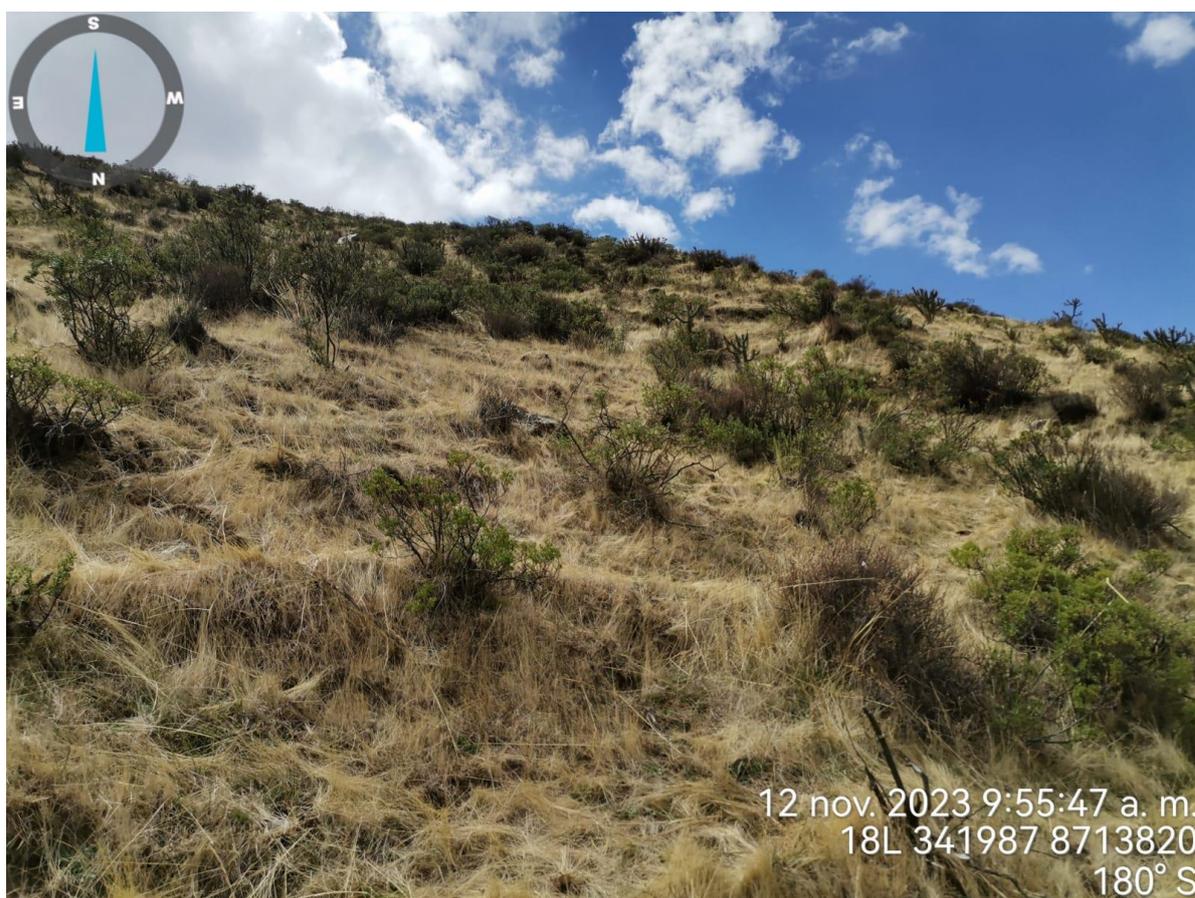
Anexo 10. Validación y mediciones del área óptima para Lloque y Colle (L7CO4)



Anexo 11. Validación y mediciones del área óptima para Chachacomo (CH2)



Anexo 12. Validación y mediciones del área óptima para Chachacomo (CH3)



Anexo 13. Validación y mediciones del área óptima para Lloque, Colle y Chachacomo (L8CO5CH4)



Anexo 14. Validación y mediciones del área óptima para Colle (CO6)



Anexo 15. Validación y mediciones del área óptima para Colle y Quinual (CO8Q3)



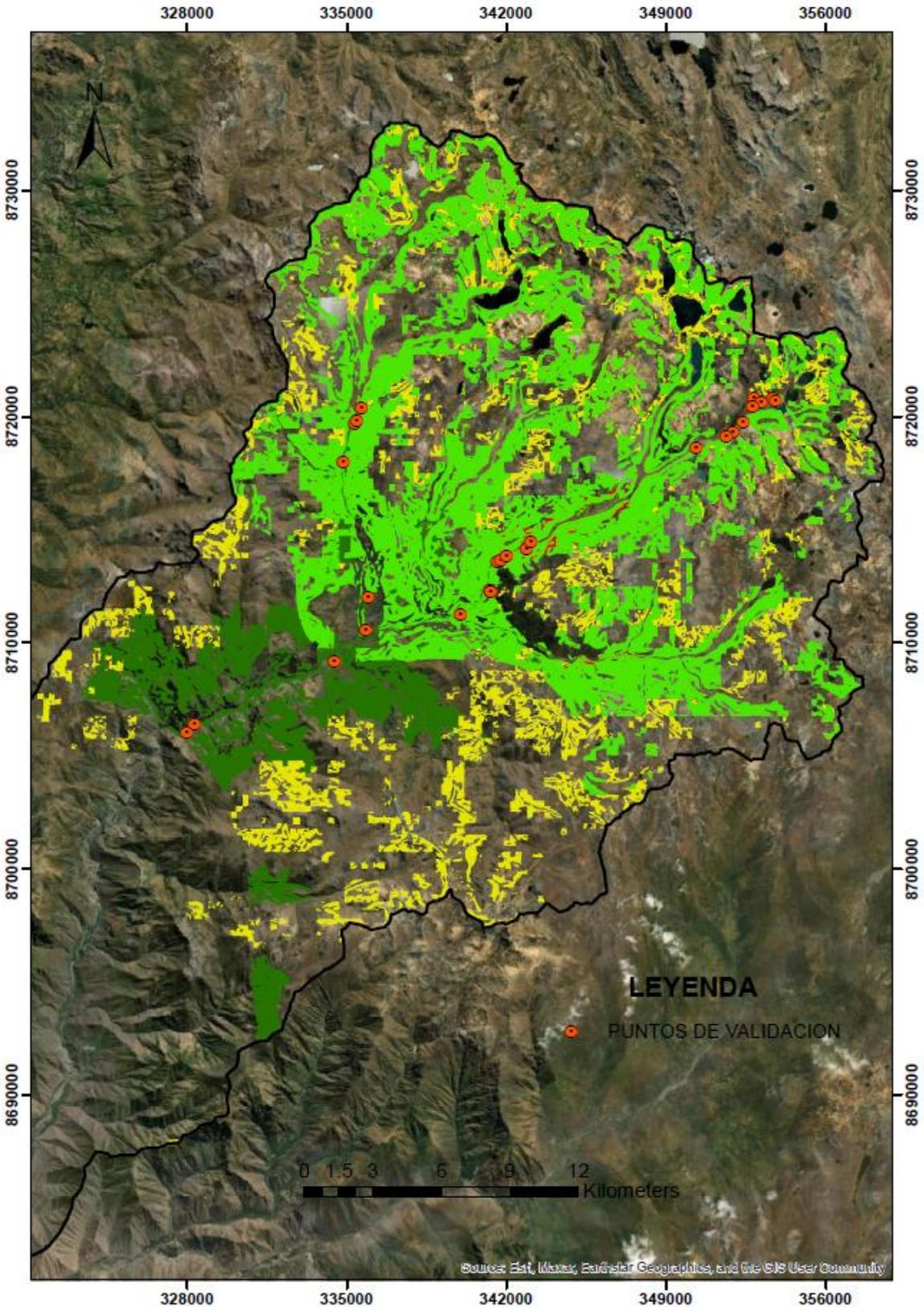
Anexo 16. Área óptima para Colle sobre andenes (zona agrícola) (CO2)



Anexo 17. Área óptima para Colle sobre construcciones (CO10)



Anexo 18. Puntos de Validación



Anexo 19. Puntos de Validación para el Colle que no corresponde



Anexo 20. Resultados del laboratorio de análisis de suelo (primera parte)

INFORME DE ANALISIS ESPECIAL EN SUELO

SOLICITANTE : JUNIOR SUAREZ FRANCO
PROCEDENCIA : LIMA/ HUAROCHIRI/ SUBCUENCA SANTA EULALIA
REFERENCIA : H.R. 80372
FACTURA : 10328
FECHA : 22/08/2023

Número Muestra		Arena %	Limo %	Arcilla %	Clase Textural	pH (1:1)
Lab	Claves					
3736	M01	74	11	15	Fr.A.	7.79
3737	M02	58	29	13	Fr.A.	5.20
3738	M03	62	29	9	Fr.A.	4.33
3739	M04	54	29	17	Fr.A.	6.17
3740	M05	70	23	7	Fr.A.	5.66
3741	M06	70	23	7	Fr.A.	5.75
3742	M07	60	25	15	Fr.A.	4.60
3743	M08	74	25	1	A.Fr.	8.24
3744	M09	77	12	11	Fr.A.	4.97*
3745	M10	56	27	17	Fr.A.	5.57
3746	M11	53	29	18	Fr.A.	6.44
3747	M12	60	25	15	Fr.A.	7.14
3748	M13	62	19	19	Fr.A.	7.64
3749	M14	52	31	17	Fr.	5.06

A = Arena ; A.Fr. = Arena Franca ; Fr.A. = Franco Arenoso ; Fr. = Franco ; Fr.L. = Franco Limoso ; L = Limoso ; Fr.Ar.A. = Franco Arcillo Arenoso ; Fr.Ar. = Franco Arcilloso ; Fr.Ar.L. = Franco Arcillo Limoso ; Ar.A. = Arcillo Arenoso ; Ar.L. = Arcillo Limoso ; Ar. = Arcilloso

* pH (1:2)

Dr. Constantino Calderón Mendoza
Jefe del Laboratorio

Anexo 21. Resultados del laboratorio de análisis de suelo (segunda parte)

INFORME DE ANALISIS ESPECIAL EN SUELO

SOLICITANTE : JUNIOR SUAREZ FRANCO
PROCEDENCIA : LIMA/ HUAROCHIRI/ SUBCUENCA SANTA EULALIA
REFERENCIA : H.R. 80493
FACTURA : 10377
FECHA : 31/08/2023

Número Muestra		Arena %	Limo %	Arcilla %	Clase Textural	pH
Lab	Claves					
4319	M15	50	34	16	Fr.	7.51
4320	M16	54	24	22	Fr.Ar.A.	7.27
4321	M17	50	34	16	Fr.	6.17
4322	M18	66	20	14	Fr.A.	6.12
4323	M19	56	28	16	Fr.A.	7.03
4324	M20	40	40	20	Fr.	5.64
4325	M21	54	32	14	Fr.A.	5.69
4326	M22	54	40	6	Fr.A.	5.93
4327	M23	66	26	8	Fr.A.	4.87
4328	M24	66	28	6	Fr.A.	5.16
4329	M25	66	28	6	Fr.A.	5.11

A = Arena ; A.Fr. = Arena Franca ; Fr.A. = Franco Arenoso ; Fr. = Franco ; Fr.L. = Franco Limoso ; L = Limoso ; Fr.Ar.A. = Franco Arcillo Arenoso ; Fr.Ar. = Franco Arcilloso ; Fr.Ar.L. = Franco Arcillo Limoso ; Ar.A. = Arcillo Arenoso ; Ar.L. = Arcillo Limoso ; Ar. = Arcilloso

Dr. Constantino Calderón Mendoza
Jefe del Laboratorio

Anexo 22. Colecta de muestra de suelo M17



Anexo 23. Colecta de muestra de suelo M18



Anexo 24. Colecta de muestra de suelo M19



Anexo 25. Colecta de muestra de suelo M20



Anexo 26. Colecta de muestra de suelo M21



Anexo 27. Colecta de muestra de suelo M22



Anexo 28. Colecta de muestra de suelo M23



Anexo 29. Lloque sobre áreas con pedregosidad superficial

