Universidad Nacional Mayor de San Marcos

Universidad del Perú. Decana de América

Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica

Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental

Análisis multitemporal del cambio de cobertura y uso de suelo (1990-2023) y su proyección al 2033 en el distrito de El Tambo, provincia de Huancayo

TESIS

Para optar el Título Profesional de Ingeniero Ambiental

AUTOR

Betsy Hilary DE LA CRUZ MUÑOZ

ASESOR

Alex Segundino ARMAS BLANCAS

Lima, Perú

2026

Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

Referencia bibliográfica

De la Cruz, B. (2026). *Análisis multitemporal del cambio de cobertura y uso de suelo (1990-2023) y su proyección al 2033 en el distrito de El Tambo, provincia de Huancayo*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.

Metadatos complementarios

Datos de autor	
Nombres y apellidos	Betsy Hilary de la Cruz Muñoz
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	77328154
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0003-4961-3345
Datos de asesor	
Nombres y apellidos	Alex Segundino Armas Blancas
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	07568033
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0003-0168-3467
Datos del jurado	
Presidente del jurado	
Nombres y apellidos	José Freddy Atuncar Yrribari.
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	25527597
Miembro del jurado 1	
Nombres y apellidos	Augusto Guillermo Bravo Malca
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	06016801
Miembro del jurado 2	
Nombres y apellidos	Oscar Eduardo Angulo Nuñez
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	43507233

Datos de investigación	
Línea de investigación	C.0.2.8. Ingeniería y tecnologías del Medio Ambiente
Grupo de investigación	No aplica
Agencia de financiamiento	Sin financiamiento
Ubicación geográfica de la investigación	País: Perú Departamento: Junín Provincia: Huancayo Distrito: El Tambo Latitud: -11.95972 Longitud: -75.15041
Año o rango de años en que se realizó la investigación	2024-2026
URL de disciplinas OCDE	Ingeniería ambiental, Sensores remotos: https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.07.04

Universidad Nacional Mayor de San Marcos

Universidad del Perú. Decana de América
FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA, METALÚRGICA Y GEOGRÁFICA
Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS PARA TITULO PROFESIONAL DE

INGENIERO AMBIENTAL

En el Salón de Grados y Títulos de la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos; el día 03 de junio del año 2026, siendo las 11:00 am., en presencia de los Señores Docentes designados como Miembros del Jurado Calificador:

Dr. JOSÉ FREDDY ATUNCAR YRRIBARI **(PRESIDENTE)**
Mg. AUGUSTO GUILLERMO BRAVO MALCA **(MIEMBRO)**
Mg. OSCAR EDUARDO ANGULO NUÑEZ **(MIEMBRO)**

Reunidos para el acto Académico Público de la Sustentación de Tesis titulada **"ANÁLISIS MULTITEMPORAL DEL CAMBIO DE COBERTURA Y USO DE SUELO (1990–2023) Y SU PROYECCIÓN AL 2033 EN EL DISTRITO DE EL TAMBO, PROVINCIA DE HUANCAYO"** presentada por Doña: BETSY HILARY DE LA CRUZ MUÑOZ egresada de la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental, para la obtención del Título Profesional de INGENIERA AMBIENTAL.

Los miembros del Jurado Calificador, escuchada la sustentación respectiva, plantearon a la graduada las observaciones pertinentes, que fueron absueltas a:

SATISFACCIÓN / BUENO/EXCELENTE

Concluida la Sustentación de Tesis/Trabajo de Suficiencia Profesional, el Jurado procedió a evaluar y calificar según el reglamento vigente, cuyo resultado fue la nota de:
.....DIECISIETE.....(17)....APROBADO....CON....MENCION....HONROSA

Habiendo sido aprobada la Sustentación de Tesis por el Jurado Calificador, el Presidente del Jurado, recomienda que la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, otorgue el **TITULO PROFESIONAL** a Doña: **BETSY HILARY DE LA CRUZ MUÑOZ.**

Siendo las 12:30 horas se dio por concluido el acto académico, expidiéndose.....(...) Actas Originales de la Sustentación de la Tesis.

Lima, 03 de junio del 2026

Dr. JOSÉ FREDDY ATUNCAR YRRIBARI
Presidente

Mg. AUGUSTO GUILLERMO BRAVO MALCA
Miembro

Mg. OSCAR EDUARDO ANGULO NUÑEZ
Miembro

Mg. ALEX SEGUNDINO ARMAS BLANCAS
Asesor

UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS
Universidad del Perú, Decana de América

Anexo 01

CERTIFICADO DE SIMILITUD

Yo, ALEX SEGUNDINO ARMAS BLANCAS en mi condición de asesor acreditado con el Dictamen de la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental N° 000016-2026-EPIA-FIGMMG/UNMSM de la tesis cuyo título es **"Análisis multitemporal del cambio de cobertura y uso de suelo (1990-2023) y su proyección al 2033 en el distrito de El Tambo, provincia de Huancayo",** presentado por la bachiller Betsy Hilary DE LA CRUZ MUÑOZ para optar el título profesional de INGENIERO AMBIENTAL.

CERTIFICO que se ha cumplido con lo establecido en la Directiva de Originalidad y de Similitud de Trabajos Académicos, de Investigación y Producción Intelectual. Según la revisión, análisis y evaluación mediante la plataforma PIDS, el documento evaluado cuenta con el porcentaje de 15 % de similitud, nivel PERMITIDO para continuar con los trámites correspondientes y para su publicación en el repositorio institucional.

Se emite el presente certificado en cumplimiento de lo establecido en las normas vigentes, como uno de los requisitos para la obtención del título profesional de INGENIERO AMBIENTAL.

Lima, 13 de Mayo de 2026

Firma del Asesor _____

Nombres y apellidos del asesor: ALEX SEGUNDINO ARMAS BLANCAS

DNI: 07568033

** La vigencia del presente certificado corresponde a un período de noventa (90) días desde la fecha de su emisión; siempre que no haya observaciones en el texto durante el proceso de revisión por el jurado informante o surja alguna contingencia.*

DEDICATORIA

Esta investigación lo dedico a mis queridos padres, Carlos de la Cruz Alfaro y Soledad Muñoz Refulio, quienes son ejemplo de superación. Gracias por el amor y apoyo incondicional que me han demostrado en cada etapa de mi vida.

También dedico esta investigación a mis hermanos: Yampier, Emerson y Carlos por su confianza y por acompañarme en el desarrollo de la tesis.

Betsy Hilary de la Cruz Muñoz

AGRADECIMIENTO

Agradezco a mi asesor MSc. Alex Segundino Armas Blancas por su valiosa guía y conocimiento técnico brindado en este tiempo. Asimismo, expreso mi más sincero agradecimiento al MSc. Gabriel Morales Martínez, quien desde la Ciudad de México me brindó orientación y tuvo la disposición de compartir sus conocimientos, los cuales enriquecieron significativamente esta investigación.

ÍNDICE

RESUMEN.....xv
ABSTRACT.....xvi
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN.....1
1.1 Situación problemática.....1
1.2 Formulación del problema.....3
1.2.1 Problema general.....3
1.2.2 Problemas específicos.....3
1.3 Justificación teórica.....3
1.4 Justificación práctica.....4
1.5 Objetivos.....4
1.5.1 Objetivo general.....4
1.5.2 Objetivo específico.....4
CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO.....5
2.1 Antecedentes de la investigación.....5
2.1.1 Antecedentes internacionales.....5
2.1.2 Antecedentes nacionales.....7
2.2 Bases teóricas.....10
2.2.1 Cobertura y uso de suelo.....10
2.2.2 Cambio de cobertura y de uso de suelo.....12
2.2.3 Teledetección.....15
2.2.4 Imagen satelital.....19
2.2.5 Preprocesamiento de la imagen satelital.....22
2.2.6 Procesamiento de imágenes satelitales.....22
2.2.7 Evaluación de la exactitud temática.....26
2.2.8 Análisis del cambio de cobertura y uso de suelo.....29
2.2.9 Proyección de cobertura y uso de suelo.....30
2.3 Marco conceptual.....37
2.3.1 Análisis multitemporal.....37
2.3.2 Área de referencia o entrenamiento.....37
2.3.3 Métrica de separabilidad Jeffries-Matusita y la Divergencia Transformada.....37
CAPÍTULO 3 ÁREA DE ESTUDIO.....39
3.1 Descripción del área de estudio.....39

3.1.1 Altitud y pendiente....42
3.1.2 Hidrografía e hidrología....45
3.1.3 Área de Conservación Regional Huaytapallana....45
3.1.4 Clima y meteorología....48
3.1.5 Peligros geológicos y vulnerabilidad....52
3.1.6 Aspectos sociales....55
CAPÍTULO 4: METODOLOGÍA....59
4.1 Tipo y diseño de la investigación....59
4.2 Hipótesis....60
4.2.1 Hipótesis general....60
4.2.2 Hipótesis específica....60
4.3 Variables....60
4.3.1 Operacionalización de variables....60
4.4 Población, unidad de análisis y muestreo....63
4.4.1 Población....63
4.4.2 Unidad de análisis....63
4.4.3 Tamaño de muestra y método de muestreo....63
4.5 Técnicas e instrumentos....65
4.5.1 Objetivo específico 1....65
4.5.2 Objetivo específico 2....66
4.5.3 Objetivo específico 3....66
4.5.4 Materiales y equipos....66
4.5.5 Análisis e interpretación....67
4.6 Procedimiento....67
4.6.1 Definición de las categorías de cobertura y uso de suelo....69
4.6.2 Preprocesamiento de imágenes satelitales....72
4.6.3 Procesamiento de las imágenes satelitales....74
4.6.4 Posprocesamiento....94
4.6.5 Análisis del cambio de cobertura y uso de suelo....94
4.6.6 Elaboración de los escenarios prospectivos....95
CAPÍTULO 5: RESULTADOS Y DISCUSIÓN....120
5.1 Objetivo N°1: Categorías de cobertura y uso de suelo para el periodo 1990-2023 aplicando la leyenda Corine Land Cover adaptada para Perú....120

5.1.1 Categorías de cobertura y uso de suelo identificadas en el distrito de El Tambo 120
5.1.2 Evaluación de la exactitud temática: Matriz de confusión, Índice de Kappa e Índice QADI 132
5.2 Objetivo N°2: Dinámica del cambio de cobertura y uso de suelo para el periodo 1990-2023 141
5.2.1 Superficie de cobertura y uso de suelo 141
5.2.2 Análisis tendencial de la cobertura y uso de suelo 150
5.2.3 Análisis de intensidad de cambio 153
5.3 Objetivo N°3: Proyección de la cobertura y uso de suelo al año 2033 180
5.3.1 Evaluación de la influencia de los impulsores de cambio 180
5.3.2 Probabilidad del cambio de cobertura y uso de suelo al año 2033 181
5.3.3 Escenarios proyectados al 2033 181
5.4 Discusión de resultados 191
5.5 Aporte de la investigación: 200
CONCLUSIONES 201
RECOMENDACIONES 203
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 205
ANEXOS 218

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Satelites Landsat.....20
Tabla 2 Características de la imagen satelital Landsat 5.....21
Tabla 3 Características de la imagen satelital Landsat 8.....21
Tabla 4 Ventajas y desventajas de los métodos de clasificación de imágenes satelitales25
Tabla 5 Matriz de Confusión.....26
Tabla 6 Rango de valores del índice de Kappa 27
Tabla 7. Rango de valores del índice QADI 28
Tabla 8. Matriz de transición.....29
Tabla 9. Modelos de proyección del cambio de cobertura y uso de suelo 31
Tabla 10. Software usado en la proyección de cobertura y uso de suelo 32
Tabla 12. Valores de Jeffries-Matusita y Divergencia Transformada 38
Tabla 13. Rangos de pendiente en el distrito de El Tambo 42
Tabla 14. Clasificación climática 48
Tabla 15. Estaciones meteorológicas – temperatura (°C) 50
Tabla 16. Estaciones meteorológicas – precipitación (mm).....51
Tabla 17. Población en el distrito de El Tambo periodo 1993 – 2024 55
Tabla 18. Centros poblados en el distrito de El Tambo.....56
Tabla 13. Operacionalización de variables.....61
Tabla 14. Matriz de consistencia.....62
Tabla 21. Cantidad de muestras para la clasificación supervisada.....64
Tabla 22. Imágenes satelitales Landsat utilizadas para realizar la clasificación supervisada 70
Tabla 23. Imágenes satelitales complementarias 70
Tabla 24. Cobertura y uso de suelo en el distrito de El Tambo según la leyenda Corine Land Cover.....71
Tabla 25. Cantidad de áreas de entrenamiento para la clasificación supervisada de los años 1990, 2003, 2013 y 2023.....77
Tabla 26. Valores de separabilidad espectral de las áreas de entrenamiento – año 2023 80

Tabla 27. Valores de separabilidad espectral de las áreas de entrenamiento – año 2013 81

Tabla 28. Valores de separabilidad espectral de las áreas de entrenamiento – año 2003 81

Tabla 29 Valores de separabilidad espectral de las áreas de entrenamiento – año 1990… 81

Tabla 30. Cantidad de muestras para la evaluación de la exactitud temática 89

Tabla 31. Transiciones y restricciones consideradas para los escenarios proyectados al 2033.....96

Tabla 32. Transiciones elegidas para realizar los escenarios proyectados al 2033 98

Tabla 33. Impulsores de cambio evaluados para la proyección de la cobertura y uso de suelo al 2033 100

Tabla 34. Variables elegidas para la proyección de la cobertura y uso de suelo al 2033 101

Tabla 35. Supuestos considerados en los escenarios restrictivos.....112

Tabla 36. Variables elegidas para el escenario de validación del 2023.....117

Tabla 37. Cobertura y uso de suelo en el distrito de El Tambo según la leyenda Corine Land Cover.....120

Tabla 38. Matriz de confusión del año 2023 132

Tabla 39. Matriz de confusión del año 2013 133

Tabla 40. Matriz de confusión del año 2003 135

Tabla 41. Matriz de confusión del año 1990 136

Tabla 42. Precisión global, Índices QADI y Kappa de los años 1990, 2003, 2013 y 2023 137

Tabla 43. Resumen de la exactitud y errores de los años 1990, 2003, 2013 y 2023 según categorìa y uso de suelo 139

Tabla 44. Superficie de las categorías de cobertura y uso de suelo para el periodo 1990 – 2023.....144

Tabla 45. Tasa de cambio para los periodos 1990-2003, 2003-2013 y 2013-2023.....154

Tabla 46. Cambio y no cambio de cobertura y uso de suelo para el periodo 1990-2023 165

Tabla 47. Resultados de los valores V-Cramer de los impulsores de cambio 180

Tabla 48. Matriz de probabilidad de cambio – Matriz de Markov.....181
Tabla 49. Superficie de cobertura y uso de suelo en los escenarios proyectados al 2033 184

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Espectro electromagnético 17
Figura 2. Línea de tiempo de los satélites del programa Landsat 20
Figura 3. Gráfico del índice de QADI 28
Figura 4. Ubicación del distrito de El Tambo 40
Figura 5. Accesibilidad 41
Figura 6. Altitud 43
Figura 7. Pendiente 44
Figura 8. Hidrografía regional 46
Figura 9. Hidrografía local 47
Figura 10. Clima y meteorología 49
Figura 11. Temperatura media mensual 50
Figura 12. Precipitación total mensual (mm) 51
Figura 13. Geodinámica externa 53
Figura 14. Susceptibilidad a inundaciones 54
Figura 15. Estancias y corrales 57
Figura 16. Centros poblados en el distrito de El Tambo. 58
Figura 17. Diagrama de flujo de la investigación 68
Figura 18. Parámetros para la corrección radiométrica 72
Figura 19. Parámetros para la corrección atmosférica de imágenes Landsat 8 (años 2023 y 2013) 73
Figura 20. Parámetros para la corrección atmosférica de imágenes Landsat 5 (años 1990 y 2003) 73
Figura 21. Configuración de la herramienta “Vegetation Delineation and Stress Detection” para el cálculo de NDVI 74
Figura 22. NDVI del año 2023 y 2013 75
Figura 23. NDVI del año 2003 y 1990 75
Figura 24. BSI del año 2023 y 2013 76
Figura 25. BSI del año 2003 76
Figura 26. BSI del año 1990 77
Figura 27. Firmas espectrales representativas – parte 1 78

Figura 28. Firmas espectrales representativas – parte 2 79
Figura 29. Imagen satelital y áreas de entrenamiento cargados en el programa ENVI para la clasificación supervisada del año 2023 82
Figura 30. Parámetros para la Clasificación de Máxima Verosimilitud 83
Figura 31. Clasificación supervisada del año 2023 84
Figura 32. Clasificación supervisada del año 2013 85
Figura 33. Clasificación supervisada del año 2003 86
Figura 34. Clasificación supervisada del año 1990 87
Figura 35. Polígono referencial de las áreas urbanizadas en el año 2023 para la distribución aleatoria estratificada de los puntos de validación 90
Figura 36. Parámetros de la herramienta Create Random Points 90
Figura 37. Parámetros de la herramienta "Confusion Matrix Using Ground Truth ROIs" 91
Figura 38. Matriz de confusión, índice de Kappa y precisión global del año 2023 92
Figura 39. Parámetros de la herramienta "QADI_Final" 93
Figura 40. Gráfico del índice QADI del año 2023 93
Figura 41. Análisis de intensidad de cambio en el programa RStudio periodo 2003-2013 95
Figura 42. Archivos de entrada para el módulo Land Change Modeler (LCM) 97
Figura 43. Mapa de transiciones de cobertura y uso de suelo para el periodo 1990-2023 97
Figura 44. Transiciones elegidas para el submodelo de transición 98
Figura 45. Evaluación de variables con V Cramer 99
Figura 46. Variables evaluadas para el escenario proyectado de cambio y uso de suelo – parte 1 101
Figura 47. Variables evaluadas para el escenario proyectado de cambio y uso de suelo – parte 2 102
Figura 48. Variables evaluadas para el escenario proyectado de cambio y uso de suelo – parte 3 103
Figura 49. Valores de configuración para el submodelo de transición 104

Figura 50. Análisis de sensibilidad del modelo con precisión (%) y medida de habilidad con una variable constante 105
Figura 51. Análisis de sensibilidad del modelo con precisión (%) y medida de habilidad con todas las variables independientes constantes excepto una 105
Figura 52. Potencial de transición – parte 1 106
Figura 53. Potencial de transición – parte 2 107
Figura 54. Matriz de probabilidad de cambio 107
Figura 55. Parámetros de entrada para el escenario tendencial del año 2033 108
Figura 56. Escenario tendencial del cambio de cobertura y uso de suelo al año 2033 108
Figura 57. Zona con Valor Histórico Cultural Pre Hispánico 110
Figura 58. Áreas con valor social, ambiental y/o histórico 111
Figura 59. Configuración para la elaboración del primer mapa restrictivo 113
Figura 60. Proyección del primer mapa restrictivo 113
Figura 61. Primer escenario restrictivo del cambio de cobertura y uso de suelo al año 2033 114
Figura 62. Configuración para la elaboración del segundo mapa restrictivo 114
Figura 63. Segundo mapa restrictivo del cambio de cobertura y uso de suelo al año 2033 115
Figura 64. Archivos de entrada para el módulo Land Change Modeler (LCM) – validación 116
Figura 65. Mapa de transiciones de cobertura y uso de suelo para el periodo 2003-2013 – validación 116
Figura 66. Transiciones elegidas para el submodelo de transición – validación 117
Figura 67. Valores de configuración para el submodelo de transición - validación 118
Figura 68. Mapa proyectado de la cobertura y uso de suelo del año 2023 118
Figura 69. Validación del modelo de proyección del año 2023 usando el programa Map Comparison Kit 3 119
Figura 70. Centros poblados de Ancalayo y Paccha 122
Figura 71. Casco urbano del distrito de El Tambo 122
Figura 72. Centro poblado Cochas Chico 123
Figura 73. Áreas agrícolas heterogéneas – CULT 124

Figura 74. Plantaciones de eucalipto.....125
Figura 75. Plantaciones de pino 126
Figura 76. Atractivos turísticos 127
Figura 77. Herbazal denso - HERD 128
Figura 78. Herbazal denso - HERD 129
Figura 79. Herbazal abierto - HERA.....130
Figura 80. Glaciar – GLA 130
Figura 81. Cuerpos de agua - AGU.....131
Figura 82. Índice QADI del año 2023.....133
Figura 83. Índice QADI del año 2013.....134
Figura 84. Índice QADI del año 2003.....135
Figura 85. Índice QADI del año 1990.....137
Figura 86. Superficie de las categorías de cobertura y uso de suelo para el periodo 1990-2023.....145
Figura 87. Mapa de cobertura y uso de suelo en el distrito de El Tambo para el año 1990 146
Figura 88. Mapa de cobertura y uso de suelo en el distrito de El Tambo para el año 2003 147
Figura 89. Mapa de cobertura y uso de suelo en el distrito de El Tambo para el año 2003 148
Figura 90. Mapa de cobertura y uso de suelo en el distrito de El Tambo para el año 2023 149
Figura 91. Tendencia del cambio de cobertura y uso de suelo para el periodo 1990-2023 - Parte 1.....152
Figura 92. Tendencia del cambio de cobertura y uso de suelo para el periodo 1990-2023 - parte 2.....153
Figura 93. Intensidad del cambio - Nivel de intervalo de tiempo.....154
Figura 94. Áreas de cambio y no cambio para los periodos 1990-2023, 1990-2003, 2003-2013 y 2013-2023 155
Figura 95. Mapa de áreas de cambio y no cambio total para el periodo 1990-2023 156
Figura 96. Mapa de áreas de cambio y no cambio total para el periodo 1990-2003 157
Figura 97. Mapa de áreas de cambio y no cambio total para el periodo 2003-2013 158

Figura 98. Mapa de áreas de cambio y no cambio total para el periodo 2013-2023 159

Figura 99. Mapa de concentración de las transiciones de cobertura y uso de suelo 161

Figura 100. Análisis de intensidad de cambio – nivel de categoría 164

Figura 101. Superficie porcentual de cobertura y uso de suelo para el periodo 1990-2023 166

Figura 102. Transiciones de cobertura y uso de suelo para los periodos 1990-2003, 2003-2013 y 2013-2023 169

Figura 103. Distribución espacial de las áreas de las transiciones para el periodo 1990-2003.....170

Figura 104. Distribución espacial de las áreas de las transiciones para el periodo 2003-2013.....171

Figura 105. Distribución espacial de las áreas de las transiciones para el periodo 2013-2023.....172

Figura 106. Intensidad del cambio - Nivel de transición (Áreas urbanizadas y áreas agrícolas heterogéneas) 175

Figura 107. Intensidad del cambio - Nivel de transición (Bosque y herbazal abierto)..176

Figura 108. Intensidad del cambio - Nivel de transición (Herbazal denso; y afloramientos rocosos y tierras desnudas).....177

Figura 109. Intensidad del cambio - Nivel de transición (Glaciares, turberas y bofedales) 178

Figura 110. Intensidad del cambio - Nivel de transición (Cuerpos de agua) 179

Figura 111. Superficie de cobertura y uso de suelo en escenarios proyectados al 2033 185

Figura 112. Mapa tendencial de cobertura y uso de suelo al año 2033.....186

Figura 113. Primer mapa restrictivo de cobertura y uso de suelo al año 2033 187

Figura 114. Segundo mapa restrictivo de cobertura y uso de suelo al año 2033 188

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Leyenda Corine Land Cover adaptada para Perú …….....…….218
Anexo 2. Combinaciones RGB de las imágenes satelitales…….221
Anexo 3. Fichas de identificación de coberturas y uso de suelo – puntos representativos.....222
Anexo 4. Fotografías de cobertura y usos de suelo tomados en campo…….....…….233
Anexo 5. Análisis de las firmas espectrales de las áreas de entrenamiento para la clasificación supervisada …….……...…….238
Anexo 6. Análisis de separabilidad espectral de las áreas de entrenamiento para la clasificación supervisada……..…….,,,,,,,,,,,,……...…….245
Anexo 7. Puntos de validación de la clasificación supervisada…….,,…….246
Anexo 8 Script usado para el Análisis de Intensidad de Cambio…….……...253
Anexo 9. Variables evaluadas para la proyección de la cobertura y uso de suelo al 2033…….254

RESUMEN

Esta investigación tuvo como principal objetivo realizar el análisis multitemporal del cambio de cobertura y uso de suelo para el periodo 1990-2023; y proyectarla al año 2033 en el distrito de El Tambo, provincia de Huancayo. Se identificaron 9 categorías de cobertura y uso de suelo de acuerdo con las categorías de Corine Land Cover adaptadas para Perú que permitieron tener una estructura jerárquica y estandarizada para compararlo con otras investigaciones: áreas urbanizadas; áreas agrícolas heterogéneas; bosque; herbazal abierto; herbazal denso; afloramientos rocosos y tierras desnudas; glaciares; turberas y bofedales; y cuerpos de agua. La clasificación supervisada de las imágenes Landsat 8 (años 2023 y 2013) y Landsat 5 (años 2003 y 1990) se realizó mediante el algoritmo de Maximum Likelihood Classification (MLC) o Clasificación de Máxima Verosimilitud. La consistencia de los resultados se sustenta en los valores del índice de Kappa superiores a 0.85 y los valores del índice QADI que oscilaron entre 0.11 y 0.13.

En el periodo 1990-2023 se observó el incremento significativo de las áreas urbanizadas en 885.51 ha (96.76 %), bosque en 523.98 ha (113.97 %); y la pérdida de las áreas agrícolas heterogéneas en 1 142.55 ha (40.31 %) y herbazal abierto en 246.06 ha (2.94 %). El herbazal denso; y afloramientos rocosos y tierras desnudas se incrementaron en 16.02 ha (1.19 %) y 112.86 ha (5.42 %) respectivamente. Los glaciares; turberas y bofedales; y cuerpos de agua en todos los años representaron menos del 3.49 % (580.41 ha) del distrito; sin embargo, en conjunto perdieron 149.76 ha. Los patrones de cambio evidenciaron principalmente el crecimiento continuo de las áreas urbanizadas sobre las áreas agrícolas heterogéneas; y la dinámica de cambio de esta última con el bosque y herbazal abierto. A nivel espacial, los cambios se presentaron mayormente en zonas ubicadas a menos de 4 100 m s. n. m.

Se realizó la proyección de la cobertura y uso de suelo usando el módulo Land Change Modeler del programa Terrset. El escenario tendencial y los escenarios restrictivos según los supuestos considerados proyectan el incremento del 73.96 % de las áreas urbanizadas y del 130.09 % de bosques; y la pérdida de casi el 50 % de áreas agrícolas heterogéneas y del 30 % del glaciar.

Palabras clave: Clasificación supervisada, cobertura y uso de suelo, Corine Land Cover, Land Change Modeler y Terrset

ABSTRACT

This study aimed to conduct a multitemporal analysis of land cover and land use change during the period 1990–2023 and to develop prospective land use scenarios projected to the year 2033 in the district of El Tambo, Huancayo Province. Nine land cover and land use classes were identified based on the Corine Land Cover categories adapted for Peru, which provided a hierarchical and standardized structure that allowed comparison with other studies: urban areas; heterogeneous agricultural land; forest; open grassland; dense grassland; rocky outcrops and bare land; glaciers; peatlands and wetlands; and water bodies. Supervised classification of Landsat 8 imagery (for 2023 and 2013) and Landsat 5 imagery (for 2003 and 1990) was performed using the Maximum Likelihood Classification (MLC) algorithm. The accuracy of the classification was supported by Kappa index values above 0.85 and QADI index values ranging from 0.11 to 0.13.

Between 1990 and 2023, urban areas increased significantly by 885.51 hectares (96.76 %), and forest areas grew by 523.98 hectares (113.97 %). In contrast, heterogeneous agricultural land decreased by 1 142.55 hectares (40.31 %) and open grassland by 246.06 hectares (2.94 %). Dense grassland and rocky outcrops/bare land also increased by 16.02 hectares (1.19 %) and 112.86 hectares (5.42 %), respectively. Glaciers, peatlands and wetlands, and water bodies collectively accounted for less than 3.49 % (580.41 hectares) of the district's area in all years analyzed; however, they experienced a combined loss of 149.76 hectares. The change patterns mainly showed the continuous expansion of urban areas over heterogeneous agricultural land, as well as the dynamic transitions of the latter with forest and open grassland. Spatially, most changes occurred in areas located below 4,000 m a. s. l.

Land cover and land use projections were performed using the Land Change Modeler (LCM) module of the TerrSet software. The trend-based and restrictive scenarios, according to the assumptions considered, project an increase of 73.96 % in urban areas and 130.09 % in forest cover, along with a loss of nearly 50 % of heterogeneous agricultural land and approximately 30 % of glacier cover.

Keywords: Supervised classification, land cover and land use, Corine Land Cover, Land Change Modeler and Terrset

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1 Situación problemática

A nivel mundial, el cambio de la cobertura y uso de suelo es causado por factores naturales y antropogénicos. De acuerdo con lo descrito por la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO, 2015) "los principales impulsores globales del cambio del suelo son el crecimiento poblacional y el crecimiento económico" (p. 6), generando así la ocupación no sostenible de áreas con importancia ambiental y/o social, lo cual influye significativamente en la pérdida de diversos servicios ecosistémicos. Además, según el Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, 2016) "la quema de combustibles fósiles y los cambios de uso de la tierra constituyen los principales procesos antropogénicos que liberan CO^2 a la atmósfera" (p. 11). De igual forma, según la FAO (2020) la transformación de los suelos en tierras para el cultivo es una de las causas principales de la liberación de gases de efecto invernadero a la atmósfera.

A nivel nacional, según el Ministerio del Ambiente (MINAM, 2015) las actividades asociadas al aprovechamiento forestal con fines de la extracción de madera y la conversión de tierras para la agricultura o cultivo de pastos han impulsado el cambio de uso de suelo principalmente en áreas de bosques. La pérdida de bosques húmedos, para el año 2020 fue de 203 272 ha (Ceplan, 2025). Mientras que los cultivos permanentes y las tierras arables del periodo del 2005 a la primera mitad del 2023 en conjunto se incrementaron en 16 097 ha; y los pastos y praderas tuvieron una reducción de 32 382 ha en el mismo periodo (Ceplan, 2025).

A nivel local, según lo descrito en el Plan de Desarrollo Local Concertado del distrito de El Tambo 2022-2032 (Municipalidad Distrital de El Tambo, 2022), el incremento de la migración local y el desarrollo de megaciudades influyen en el uso de suelo. Además, las investigaciones a nivel local relacionan el crecimiento urbano con el cambio de las áreas agrícolas. Por ejemplo, Granados (2023) sostiene que la urbanización en el Valle del Mantaro ha perjudicado el uso sostenible de las áreas agrícolas y las bajas densidades poblacionales visibilizan el crecimiento horizontal de la ciudad, lo cual ha generado la reducción de zonas productivas, afectando a la agricultura y el abastecimiento de alimentos. De igual forma, Arana (2018) concluye que en el periodo de 1965-2015 el acelerado crecimiento urbano ha causado la pérdida de tierras agrícolas, pérdida de bosques, áreas naturales y cuerpos de agua en el Valle del Mantaro. Sin embargo, Tinocco (2024) en la provincia de Huancayo identificó algunos patrones de transición diferentes; como el incremento de áreas de cultivos y cuerpos de agua (lagos y lagunas).

En base a lo mencionado, es evidente el cambio de cobertura y uso de suelo tanto a nivel nacional por lo que es necesario realizar el análisis multitemporal para determinarla dinámica de cambio propia del distrito de El Tambo. Asimismo, es relevante integrar información secundaria y primaria que permita validar la cobertura y uso de suelo en el límite jurisdiccional aplicando la leyenda Corine Land Cover que presenta una estructura jerárquica de las categorías y permite la comparación de los resultados con otras áreas independientemente de su ubicación y superficie. Adicionalmente, es importante proyectar los cambios futuros que orienten la implementación de la planificación territorial, la conservación de ecosistemas altoandinos y la gestión ambiental local. En ese sentido, esta investigación brinda resultados del análisis multitemporal del cambio de cobertura y uso de suelo para el periodo 1990-2023 del distrito de El Tambo; y proyección de escenarios de cobertura y uso de suelo al año 2033.

1.2. Formulación del problema

1.2.1 Problema general

- ¿Cuál es el cambio de la cobertura y uso de suelo para el periodo 1990-2023 y cuál es su proyección al 2033 en el distrito de El Tambo, provincia de Huancayo?

1.2.2 Problemas específicos

- ¿Cuáles son las categorías de cobertura y uso de suelo para el periodo 1990-2023 aplicando la leyenda Corine Land Cover adaptada para Perú en el distrito de El Tambo, provincia de Huancayo?
- ¿Cómo es la dinámica del cambio de cobertura y uso de suelo para el periodo 1990-2023 en el distrito de El Tambo, provincia de Huancayo?
- ¿Cuál es la proyección de la cobertura y uso de suelo en el año 2033 en el distrito de El Tambo, provincia de Huancayo?

1.3 Justificación teórica

Se revisaron diferentes investigaciones a nivel del Valle del Mantaro, subcuenca Shullcas e incluso a nivel de la provincia de Huancayo; sin embargo, han estado enfocadas principalmente en la relación del crecimiento urbano y áreas agrícolas; y el nivel de escala de dichos estudios no permite identificar y analizar la dinámica propia del distrito de El Tambo.

En esta investigación se realizó el análisis multitemporal del cambio entre las 9 categorías de cobertura y uso de suelo que componen el distrito de acuerdo con la leyenda Corine Land Cover adaptada para Perú. Los resultados incluyen información primaria de las categorías de cobertura y uso de suelo del distrito destacando sus particularidades; así como análisis estadísticos y espaciales de los patrones de transición del periodo 1990–2023. Adicionalmente, se proyectó 1 escenario tendencial y 2 escenarios restrictivos al año 2033. En conjunto, estos resultados sirven para la toma de decisiones oportunas en torno a la gestión del territorio; así como para prevenir impactos negativos ambientales,

sociales y económicos asociados al cambio de cobertura y uso de suelo en el distrito de El Tambo.

1.4 Justificación práctica

La metodología aplicada en esta investigación se adapta a diferentes escalas y contextos socioecológicos, ya que utiliza como base información espacial obtenida a nivel local, regional o nacional. Asimismo, se pueden usar imágenes satelitales y software que son de acceso gratuito.

Adicionalmente, la aplicación de la metodología del Análisis de Intensidad de Cambio propuesta por Aldwaik & Pontius Jr (2012) permitió analizar la dinámica de cambio a nivel de intervalo, categoría y transición; brindando un enfoque más detallado no solo a nivel cuantitativo, sino espacial de los diferentes patrones de transición. En consecuencia, se sugiere su uso en este tipo de investigaciones de cambio de cobertura y uso de suelo.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo general

- Determinar el cambio de cobertura y uso de suelo para el periodo 1990-2023 y su proyección al año 2033 en el distrito de El Tambo, provincia de Huancayo.

1.5.2 Objetivo específico

- Identificar las categorías de cobertura y uso de suelo para el periodo 1990-2023 aplicando la leyenda Corine Land Cover adaptada para Perú en el distrito de El Tambo, provincia de Huancayo.
- Determinar la dinámica del cambio de cobertura y uso de suelo para el periodo 1990-2023 en el distrito de El Tambo, provincia de Huancayo.
- Determinar la proyección de la cobertura y uso de suelo al año 2033 en el distrito de El Tambo, provincia de Huancayo.

CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes de la investigación

2.1.1 Antecedentes internacionales

Balieiro & Veloso (2022) en su estudio "Análisis multitemporal de la cobertura del suelo de la Tierra Indígena Ituna – Itatá a través de la clasificación supervisada de imágenes satelitales" identificaron el cambio de la cobertura del suelo en el periodo 2015-2020 en un área de 142 527.26 ha que es ocupada por pueblos originarios. Realizaron la clasificación supervisada de las imágenes Landsat OLI-8 y Sentinel 2-A e identificaron como principal cambio el incremento significativo de las áreas de agricultura/pastoreo que pasaron de ocupar el 0.12 % a representar casi el 12 % del territorio; y la reducción de bosques en casi el 12 % lo cual estaría asociado a la construcción de accesos ilegales y la siembra de pastizales.

Pabón (2022) en su investigación "Análisis de los procesos de cambio de uso y cobertura del suelo en la microcuenca del río Tabacay" analizó el cambio en una superficie de 6832.60 ha; realizó mapas de uso y cobertura de suelo de los años 1990, 2000, 2008, 2014 y 2018; y generó escenarios futuros al 2025 y 2040 usando el software IDRISI. En la proyección usó 7 impulsores de cambio: pendiente, altitud, distancia a cuerpos de agua, distancia a vías de acceso, distancia a centros poblados, precipitación media y evapotranspiración anual. Identificó 5 categorías: vegetación arbustiva/herbácea, bosque, páramo, tierra agropecuaria y zona antrópica. Los resultados mostraron la disminución de la vegetación arbustiva/herbácea, bosque y páramo en el periodo 1990-2018 causado por el aumento de las áreas agropecuarias. Los escenarios proyectados al 2040 muestran el

crecimiento de la zona antrópica y la preservación del páramo condicionada por la reducción de la tierra agropecuaria.

Morales (2021) en su investigación "Dinámicas periurbanas prospectivas del cambio de coberturas del sistema socio-ecológico del suelo de conservación de la Ciudad de México" analizó las dinámicas periurbanas prospectivas del sistema socio-ecológico en la cuenca suroriente del Suelo de Conservación de la Ciudad de México que tiene una superficie de 20 645.87 ha. Realizó la clasificación supervisada de imágenes satelitales Landsat de los años 1993, 2009 y 2019; luego analizó los impulsores de cambio (biofísicos, sociodemográficos, infraestructura y política pública ambiental) y generó 2 escenarios prospectivos para el año 2039 usando el programa Terrset. El patrón de cambio que identificó parte de la conversión de bosques a pastizales, de pastizales a áreas agrícolas y finalmente las áreas agrícolas se convierten en asentamientos humanos. Adicionalmente, los resultados prospectivos tanto para el escenario restrictivo y tendencial mostraron que continuará la tendencia de la reducción de las áreas agrícolas causada por la expansión de asentamientos humanos.

Barrios & Ochoa (2021) en su investigación "Análisis multitemporal de cambios de uso del suelo y cobertura en la cuenca del río Bogotá desde el 2013 a 2020". Procesaron imágenes Landsat 8 en ArcGIS 10.5 y realizaron la clasificación supervisada considerando la leyenda Corine Land Cover. Como resultado, identificaron 9 tipos de coberturas: Tejido urbano discontinuo; tejido urbano continuo; cultivos permanentes; mosaicos de pastos y cultivo; bosque denso bajo; bosque denso alto; zonas de extracción minera; y cuerpos de agua (naturales y artificiales). Los resultados mostraron el incremento de casi el 30 % del tejido urbano, 46 % de cultivos permanentes y 12 % de las zonas de extracción minera.

Maurya *et al*. (2021) en su investigación "Spatio-temporal analysis of Land Use/Land Cover change through overlay technique in Kinnaur district of western Himalaya" identificaron los patrones de cambio del uso de la tierra en el distrito de Kinnaur en el periodo de 1990 a 2018. Para lograr ello, procesaron imágenes Landsat TM, ETM+ y OLI e información secundaria en programas como ArcGIS 10 y Erdas Imagine 9.2. Los resultados mostraron el incremento de las áreas urbanizadas, agrícolas y

hortícolas; y el aumento de la precipitación sólida (nieve); y la disminución gradual de tierras sin vegetación o baldías.

2.1.2 Antecedentes nacionales

En el ámbito nacional se encontraron diferentes investigaciones que analizaron el cambio de cobertura y uso de suelo:

Aguilar & Orosco (2023) en su investigación "Análisis multitemporal del cambio de uso de suelo, utilizando el método de Markov, en la provincia de Coronel Portillo, departamento de Ucayali periodo 2000-2030" evaluaron y analizaron el cambio de uso de suelo en una superficie de 102 199.28 km^2 y realizaron la proyección al año 2030. Iniciaron con la clasificación supervisada de imágenes Landsat de los años 2000, 2010 y 2019 usando el algoritmo Maximun Likelihood y la leyenda Corine Land Cover con el cual identificaron 6 categorías: áreas urbanizadas, áreas agrícolas, hidrografía, áreas sin o con poca vegetación, bosques y áreas con vegetación herbácea. Luego, para la elaboración del escenario prospectivo al año 2030 utilizaron el programa Terrset y consideraron 4 impulsores de cambio: pendiente; distancia a vías principales y secundarias; distancia a ríos; y distancia a centros poblados. Los resultados para el periodo 2000-2019 muestran la disminución de áreas boscosas, mientras que las otras categorías tuvieron una tendencia creciente. Por último, el escenario proyectado al 2030 prevé el incremento de las zonas agrícolas y la disminución de bosques.

Idrogo (2022) en su investigación "Análisis de cambios de cobertura y uso de la tierra con imágenes satelitales del distrito de Sócota – Cutervo periodo 2002-2017", analizó los cambios de cobertura y uso de tierra en el periodo de 15 años en una superficie de 15 458.20 ha. Realizó la clasificación supervisada de imágenes satelitales Landsat de los años 2002 y 2017 usando los algoritmos Random Forest y Máxima Verosimilitud; y consideró las categorías de Corine Land Cover adaptada para Perú. Posteriormente, para evaluar la consistencia de los resultados, visitó el lugar de estudio; y usó imágenes de mayor resolución como RapidEye y ortofotos de Google Earth. Identificó 9 categorías: Áreas agrícolas heterogéneas, herbazal, áreas urbanizadas, pastos, bosque denso bajo, bosque abierto bajo, arbustal, vegetación arbustiva/herbácea y tierras desnudas; siendo las 2 primeras las de mayor extensión llegando a ocupar cerca del 81 % en el 2017. Los

resultados evidenciaron la disminución del arbustal y del bosque abierto bajo; mientras que las áreas agrícolas heterogéneas y herbazal aumentaron en superficie. En general, casi el 36 % del territorio presentó algún tipo de transición.

Mucha (2020) en su investigación “Análisis de la variación de la cobertura y uso actual de tierras de la subcuenca del Cunas durante el periodo 1987-2017” determinó y analizó la variación de la cobertura y uso actual en un área de 34 546.61 km^2. Realizó la clasificación supervisada de imágenes Landsat 5 y Landsat 8 mediante el algoritmo Random Forest y consideró las categorías según Corine Land Cover hasta el nivel IV. Por último, calculó la tasa de cambio para un periodo de 30 años. En el nivel I identificó 5 categorías: superficies de agua, áreas artificiales, bosques, áreas agrícolas, áreas mayormente naturales y áreas húmedas. En los niveles II, III y IV identificó de forma más detallada 8, 12 y 15 categorías respectivamente. Los resultados mostraron que el 3.3 % (5 591.8 ha) del territorio cambió en el periodo de 30 años, donde el intervalo 2007 a 2017 presentó la mayor tasa de cambio con un valor de 7.8 % a diferencia de los otros periodos donde el valor no superó el 3.5 %. Se observó la tendencia creciente del tejido urbano continuo, plantaciones forestales y áreas de extracción de minería; y las principales transiciones se observan en el cambio de cultivos a tierra desnuda, herbazales densos a cultivos y áreas quemadas a herbazales abiertos.

Tinoco (2024) en su investigación “Cambio de cobertura y uso de suelo en la provincia de Huancayo, periodo 2000-2021” realizó la clasificación supervisada mediante el algoritmo de Máxima Verosimilitud de imágenes Landsat 7 y Landsat 8 OLI de los años 2000, 2005, 2010, 2015 y 2021. Además, revisó imágenes de alta resolución y realizó trabajo de campo para validar sus resultados. De acuerdo al nivel I de la leyenda Corine Land Cover identificó 4 categorías: áreas artificializadas; áreas agrícolas; bosques y áreas mayormente naturales; áreas húmedas; y superficies de agua. En el nivel II y en el nivel III identificó 9 y 14 categorías respectivamente. Los resultados muestran que los cultivos permanentes; tejido urbano continuo; tejido urbano discontinuo; y mosaico de pastos y cultivos fueron las 4 categorías con mayor incremento. Mientras que las 3 principales categorías que perdieron superficie fueron los glaciares; arbustales; y las turberas y bofedales. Según el autor, los principales impulsores de cambio corresponden a la quema,

sobrepastoreo, crecimiento urbano, cambio climático, expansión agrícola en la selva, entre otros.

Arauco *et al.* (2020) en su artículo "Dinámica de cambios de usos de suelo mediante agentes inteligentes y cadenas de Markov en el distrito de Huancayo" determinó la influencia de los cambios de usos de suelo en la distribución de las actividades socioeconómicas y comerciales en el área de estudio. Además, realizó una proyección al año 2035 con el programa Dinámica EGO considerando 4 impulsores de cambio: pendiente, altitud del terreno, distancia de las vías urbanas y distancia a centros poblados. Inició con la clasificación de imágenes Landsat 7 de los años 1995, 2000, 2005, 2010 y 2015 donde determinó 7 categorías: predominio residencial, predominio comercial, industrial, agrícola – forestal, equipamiento existente, área reservada para equipamiento y vías urbanas. Los resultados proyectados muestran una expansión de las vías y crecimiento urbano; así como la pérdida de suelo agrícola. Además, los investigadores atribuyen el aumento de las actividades económicas y la migración de las personas que viven en zonas rurales hacia la zona urbana con el crecimiento de las zonas periurbanas de la ciudad de Huancayo.

Arana (2018) en su investigación "El crecimiento urbano y su influencia por el cambio de uso de tierras en el Valle del Mantaro" analizó el cambio de uso de suelo en el periodo de 1965 a 2015 en el Valle del Mantaro que geográficamente involucra a las ciudades de Huancayo, Jauja, Concepción y Chupaca. Realizó el procesamiento y la clasificación supervisada de imágenes satelitales Landsat; y revisó aerofotografías SPOT. En la zona de la ciudad de Huancayo, en el nivel I según Corine Land Cover identificó 4 categorías: áreas artificializadas; áreas agrícolas; bosques y áreas mayormente naturales; y áreas húmedas superficiales de agua. Mientras que en el nivel II y nivel III fueron 11 y 15 categorías. Los resultados muestran el crecimiento no planificado de áreas urbanizadas sobre áreas agrícolas; así como el incremento de bosques plantados y áreas sin o con poca vegetación. Además, se observa la tendencia decreciente de las áreas con vegetación herbácea y/o arbustiva, así como de las áreas húmedas continentales (cuerpos de agua). Se observó el incremento significativo en casi el 425 % de las áreas artificializadas a

diferencia de las áreas agrícolas que perdieron cerca del 40 % de su área inicial; de igual forma las áreas húmedas y superficies de agua perdieron cerca del 24 % de su superficie.

2.2 Bases teóricas

2.2.1 Cobertura y uso de suelo

La cobertura de suelo es la clasificación de la superficie según sus características biofísicas, por ejemplo: cultivos, superficie urbana, etc. Mientras que, el uso de suelo se refiere a la clasificación con un enfoque social y antrópico, es decir sus funciones o usos relacionados con las actividades socioeconómicas (Maquera, 2020). El término cobertura y uso de suelo integra ambas definiciones, destacando que, si bien el uso de suelo es un proceso dinámico, la cobertura de suelo refleja el resultado de estas actividades, por lo que es relevante analizarlos en conjunto para fortalecer la gestión sostenible del suelo (Choudhary, 2025).

La cobertura de suelo involucra diferentes componentes que se encuentran en un espacio y es resultado de procesos naturales o antropogénicos (Gonzáles & Romero, 2013). Por ejemplo, se consideran a los bosques, arbustales, pastos, entre otros; así como las superficies sin vegetación (zonas de afloramientos rocosos y cuerpos de agua). El término “Uso de la tierra” es la utilidad designada por la población de forma permanente o temporal, impulsada por la necesidad del aprovechamiento y obtención de recursos naturales (Gonzales y Romero, 2013).

En resumen, la cobertura de tierra se define como la parte física y morfológica del suelo, mientras que el uso de tierra se relaciona con las actividades productivas que se dan sobre ellas impulsado por las características sociales y económicas de la población.

2.2.1.1 Sistemas de clasificación cobertura y uso de suelo a nivel internacional.

A nivel internacional, la Unión Geográfica Internacional (UGI) ha clasificado el uso de suelo en 9 categorías:

1. Áreas urbanas y/o instalaciones gubernamentales y privadas.
2. Terrenos con hortalizas.

3. Terrenos con huertos de frutales y otros cultivos perennes.
4. Terrenos con cultivos extensivos (papa, camote, yuca, etc.).
5. Áreas de praderas mejoradas permanentes
6. Áreas de praderas naturales
7. Terrenos con bosques
8. Terrenos pantanosos y/o cenagosos
9. Terrenos sin uso y/o improductivos.

Por su parte, el IPCC (2016) en el manual para calcular la emisión y la captura de gases de efecto invernadero del Sector del Uso de la Tierra, Cambio de Uso de la Tierra y Silvicultura (UTCUTS) considera 6 categorías principales de uso de suelo:

1. Tierras forestales
2. Tierras agrícolas
3. Praderas
4. Humedales
5. Asentamientos
6. Otras tierras

Por último, el programa Coordination of Information of the Environment (CORINE) inició en 1985 para realizar una base de datos de la cobertura de suelo a una escala de 1:100 000 del continente europeo. Es útil en el ordenamiento territorial y en los últimos años diferentes países principalmente en Latinoamérica lo han adaptado a su contexto nacional. Según el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM, s.f.) esta metodología permite la clasificación de categorías y subcategorías de cobertura y uso de suelo en orden jerárquico.

2.2.1.2 Sistemas de clasificación cobertura y uso de suelo a nivel nacional.

El Ministerio del Ambiente (MINAM) a través de la Dirección General de Ordenamiento Territorial (DGOT) realizó la adaptación de la metodología Corine Land Cover en el año 2012 para el contexto nacional y en el Informe Final del Proyecto Análisis de las Dinámicas de Cambio de Cobertura de la Tierra en la Comunidad Andina (Arnillas *et al.,* 2012) publicado el 2014 incluyeron nuevas categorías. En el Anexo 1 se detallan las categorías y subcategorías Corine Land Cover adaptadas para Perú.

Se precisa que, en esta investigación se consideró las categorías Corine Land Cover ya que permite tener una jerarquía de las categorías; y obtener resultados comparables con otras investigaciones independientemente de su ubicación geográfica y unidad de estudio (distrito, provincia, departamento, cuenca, etc.).

2.2.2 Cambio de cobertura y de uso de suelo

"El cambio de la cobertura del suelo se define como la transformación de la apariencia física de un paisaje determinado y el cambio en el uso de la tierra, como los cambios en el manejo de la tierra y sus atributos" (Montero & Viales, 2015, p.25). Este proceso es resultado de diferentes factores naturales y/o antrópicos; sin embargo, estos últimos tienen mayor influencia.

Las investigaciones de cambio de cobertura y uso de suelo contribuyen al ordenamiento territorial a diferentes escalas, planificación del uso del territorio, identificación de los conflictos de uso, reconocimiento de los problemas asociados y supervisión de la gestión de los recursos. Además, sirven de base para el desarrollo de estudios e investigaciones relacionadas con la valoración y cuantificación de servicios ambientales (Rodríguez *et al.*, 2013). Asimismo, dan a conocer dinámicas espaciales y temporales que resulta relevante para el desarrollo territorial sostenible (Maquera, 2020). Es decir, los resultados permiten identificar los patrones de cambio en un periodo de tiempo, en términos de cantidad, ubicación y distribución espacial.

2.2.2.1 Impulsores del cambio de cobertura y uso de suelo.

Según el Ministerio del Ambiente – MINAM (2016), los factores de cambio de la cobertura y uso de suelo se agrupan en 5 categorías:

- Económicos productivos: Actividades económicas, productivas, de servicio u otros. Además, involucra la construcción de infraestructura (accesos, viviendas, entre otros.) en áreas de crecimiento urbano.
- Políticos: Políticas públicas que promueven el crecimiento y desarrollo económico del país; y que influyen en las actividades económicas y la implementación de nuevas vías e infraestructuras para la población.
- Demográfico: Proceso migratorio impulsado por aspectos sociales y/o ambientales que influyen en las características de la población.

- Institucional: Legislación establecida las cuales pueden restringir, permitir o promover el uso no planificado y sostenible del territorio.
- Socioculturales: Cosmovisión y cultura de las comunidades campesinas o nativas que se expresan a través de las actividades productivas económicas y por ende en el manejo que tienen en su territorio.

También se consideran a los fenómenos naturales (inundaciones, sismos, etc.) que limitan el acceso a ciertos recursos con alta demanda y predispone el manejo no adecuado del territorio (Lambin *et al*., 2003; Lopez, 2022). Además, considerando el contexto ambiental actual, los incendios forestales, lluvias intensas y las sequías pueden ser más frecuentes y por ende se convierten en impulsores de cambio. Por último, la globalización facilita la actividad comercial de bienes y servicios; y acelera el cambio de uso de suelo para poder satisfacer las necesidades globales.

En conclusión, el cambio de cobertura y uso de suelo es resultado de la interacción de diferentes impulsores de cambio, cuyo análisis e integración en su totalidad en este tipo de investigación resulta difícil debido a la falta de información y la complejidad de su representación espacial, principalmente de las variables socioeconómicas como las normas y políticas públicas (Jaramillo *et al*., 2025).

A nivel del Valle del Mantaro, se revisaron investigaciones donde analizaron la dinámica del cambio solo entre áreas agrícolas y área urbanas. Por ejemplo, Sánchez (2024) concluye que la cercanía de la red vial a las áreas agrícolas incrementa el valor económico por lo que es más rentable venderlo para uso urbano. Por su parte, Arana (2018), menciona que los procesos migratorios del campo a la ciudad han generado el crecimiento urbano sobre áreas agrícolas, principalmente en la periferia de las ciudades.

A nivel de la ciudad de Huancayo, Arauco (2020) también considera como impulsores de cambio el incremento descontrolado de la migración de la población rural a la ciudad, el crecimiento horizontal de la ciudad y la construcción de vías. Además, para la proyección del uso de suelo (predominio residencial, comercial, industrial, agrícola-forestal, equipamiento existente, área reservada para equipamiento y vías urbanas) al año

2035 solo utilizó 4 impulsores de cambio: elevación, pendiente, distancia a vías y distancia a centros poblados.

Considerando lo mencionado anteriormente, en esta investigación para la etapa de proyección de la cobertura y uso de suelo al año 2033 se evaluaron diferentes impulsores de cambio ampliamente usados en la bibliografía; y otras adicionales elegidas en base a la información disponible en fuentes oficiales. Su descripción, representación y evaluación se detallan en el ítem 4.4.6.2 Potencial de transición.

2.2.2.2 Efectos del cambio de cobertura y uso de suelo.

Según el IPCC (2016) y la FAO (2020) el uso de combustibles fósiles y los cambios de uso de suelo causados por actividades antrópicas contribuyen en gran medida a la liberación de CO^2. Mientras que, "El cambio de uso de la tierra, la intensificación del uso de la tierra y el cambio climático han contribuido a la desertificación y a la degradación de la tierra" (IPCC, 2020, p.8).

Existe una relación compleja y bidireccional entre el cambio climático y el cambio de cobertura y uso de suelo (Bununu *et al*, 2023). Por ejemplo, la expansión de la frontera agrícola, urbanizaciones y la pérdida de bosques contribuyen al aumento de gases de efecto invernadero debido a la pérdida de cobertura vegetal y su capacidad para absorber carbono. Esto a su vez, genera la variación del microclima y el proceso hidrológico. Por su parte, el cambio climático genera contextos de vulnerabilidad, donde se condiciona el uso de cultivos más resistentes, limita la productividad agrícola y la continuidad de la cobertura y uso de suelo (Bununu *et al.*, 2023).

Adicionalmente, el cambio de cobertura y uso de suelo alteran los ecosistemas y los diversos servicios ecosistémicos asociados (Vega & Espinoza, 2024). Por ejemplo:

- Alteración del ciclo hidrológico y pérdida de calidad de agua: La pérdida de cobertura vegetal reduce la infiltración de la precipitación y facilita la inundación de las zonas. Asimismo, aumenta la evaporación del agua que se almacena en los suelos (Romero y Vásquez, 2005).

- Efectos sobre los hábitats terrestres: A largo plazo se pierde la biodiversidad causada por la reducción y fragmentación del ecosistema (Romero y Vásquez, 2005).

En resumen, el cambio de cobertura y uso de suelo tiene impacto a nivel ambiental, social y/o económico; ya que sus efectos colaterales se relacionan con el cambio climático, afectación de la biodiversidad (flora y fauna), la degradación del suelo, pérdida de los servicios ecosistémicos, entre otros.

2.2.3 Teledetección

La teledetección "[…] permite medir varios parámetros al mismo tiempo y de forma remota con respecto al objeto medido, incluidas observaciones globales" (Navarro *et al.,* 2024, p.138). No solo involucra la obtención de la información de los satélites o equipos aéreos (aviones o drones) sino que considera la etapa de procesamiento y análisis (Arbelo *et al*, 2012). "Un ejemplo de las potencialidades de la teledetección en sistemas naturales es su capacidad para distinguir entre diferentes coberturas vegetales, usos del suelo, masas de agua e, incluso, detectar otros fenómenos naturales provocados por la actividad humana (ej., deforestación)" (Navarro *et al*., 2024, p. 140). Otras ventajas asociadas que facilitan el monitoreo y seguimiento de diversos eventos de interés y permiten el ahorro del recurso tiempo y dinero:

- Visión global: Permite observar eventos globales como las masas de nubes, bosques amazónicos, áreas de cultivos, entre otros (Martínez y Martín, 2010).
- Observación de información en regiones no visibles del espectro: Obtención de información de rangos visibles y no visibles, permitiendo un mayor entendimiento de diferentes procesos y sus consecuencias (temperatura de océanos, incendios forestales, zonas con abundante vegetación, etc.) (Martínez y Martín, 2010).
- Observación a diferentes escalas: Es posible realizar investigaciones que abarquen grandes extensiones o también áreas mínimas donde se puedan observar incluso los límites de construcciones, esto dependerá de las características del satélite (Martínez y Martín, 2010).

- Frecuencia: Monitoreo de cambios rápidos como los fenómenos naturales (tormentas, huracanes, zonas de incendios, etc.) u otros con efectos a largo plazo como la deforestación, expansión urbana, pérdida de glaciares, etc. (Martínez y Martín, 2010).

2.2.3.1 Componentes.

Los 4 componentes fundamentales son: la energía electromagnética; el medio de propagación (atmósfera); las diferentes coberturas y objetos que interactúan con la energía electromagnética; y finalmente el sistema o herramienta de medición (Coronel, 2022). Se inicia con la fuente que brinda energía al objeto de interés (por ejemplo, zonas de cultivo, bosque, glaciar, etc.); usualmente el sol es la fuente de energía que atraviesa la atmósfera. Luego, la energía llega a la superficie terrestre donde interactúa con los objetos y la radiación es reflejada. Por último, un sensor a bordo del satélite recibe e interpreta esa radiación reflejada (Arbelo *et al.,* 2012).

2.2.3.2 Espectro electromagnético.

El espectro involucra diferentes tipos de ondas agrupadas según su longitud de onda que se mide principalmente en micrómetros (µm, 10^{-6} m) o nanómetros (nm, 10^{-9} m) (Arbelo *et al.,* 2012). En la Figura 1 se observan las siguientes regiones del espectro: Radio, microondas, radiación infrarroja (RI), visibles, radiación ultravioleta (UV), rayos X y rayos Gamma. Los rangos de estos son:

> En teledetección, los sensores pasivos más frecuentes operan en los rangos de la luz visible (~ 430–720 nm), el infrarrojo cercano (NIR, ~ 750–950 nm, 780 nm–1 µm, 750 nm–1,4 µm), el infrarrojo de onda corta (SWIR, 1,4–3 µm), el infrarrojo medio (MIR, 3 a 8 µm), el infrarrojo de onda larga (LWIR, 8 a 15 µm) y el infrarrojo lejano (FIR, 15 a 1000 µm). (Navarro *et al*., 2024, p. 140)

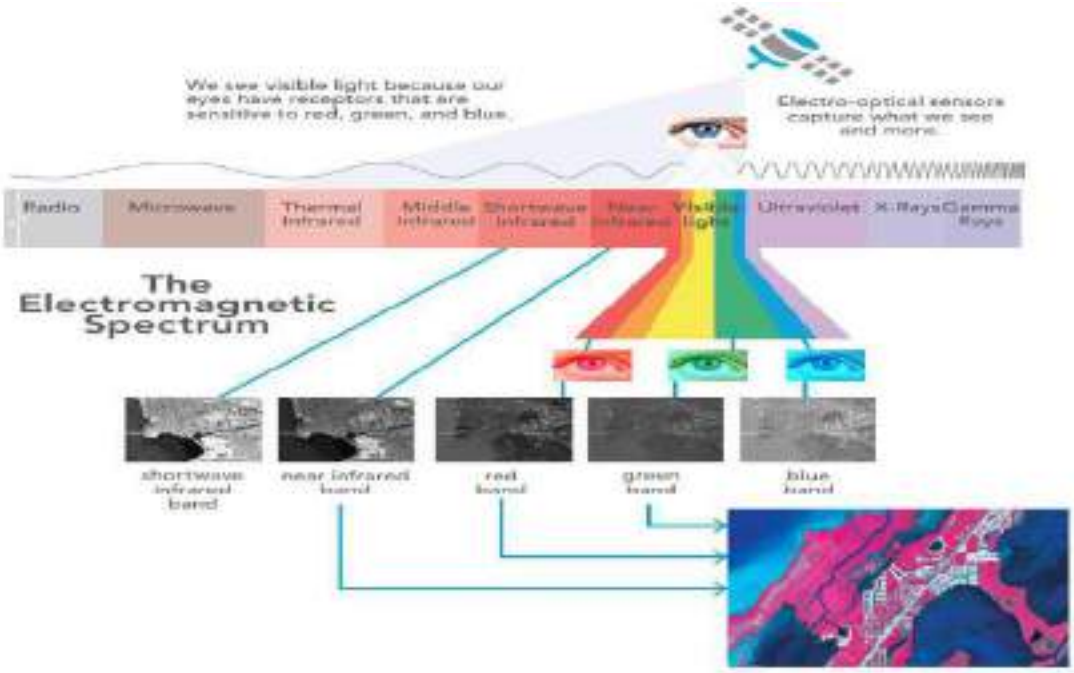


Figura 1. Espectro electromagnético
Fuente. Environmental Systems Research Institute - Esri (2016).

2.2.3.3 Tipos de sensores.

El sensor remoto ubicado en los satélites recibe la energía de la superficie y se clasifican en 2 tipos:

- Sensores pasivos: Captan la luz reflejada o emitida de los objetos (Esri, 2016). Algunos ejemplos son las cámaras fotográficas, cámaras de video, sensores de radar o infrarrojos y los sensores multiespectrales (Idrogo, 2022; Navarro *et al*., 2024).
- Sensores activos: Son aquellos que emiten energía hacia la superficie terrestre u otro objeto y detectan la radiación reflejada. "Esta señal puede ser luz, sonido, radiofrecuencia, microondas u otros tipos de ondas electromagnéticas. […] espera a que la señal se refleje o rebote en el objeto para, posteriormente, recoger y analizar la señal reflejada […]" (Navarro *et al*., 2024, p.139). Por ejemplo, el RADAR mide los ecos de determinados objetos (nubes de lluvia), el LIDAR capta valores de elevación y el SONAR mide la profundidad del mar (Esri, 2016).

2.2.3.4 Resolución de los sensores.

La resolución se debe a que "Los sensores miden la radiación emitida o reflejada en cuatro dimensiones: espacio, tiempo, longitud de onda y radiancia" (Navarro *et al*., 2024, p.143). Estas dimensiones definen los siguientes tipos de resolución:

- Resolución espacial: Es la medida lineal o angular mínima que puede captar el sensor y se representa mediante el pixel que es la unidad mínima de una imagen digital y se expresa en metros o metros/píxel (Arbelo *et al.*, 2012). Una mayor resolución brinda mayor detalle en una imagen, es decir una imagen con resolución de 10 m permite observar objetos más pequeños o con mayor detalle respecto a una imagen de 30 m. Por ejemplo, MODIS tiene una resolución baja de 250 m; Landsat y Sentinel tienen resolución media de 30 m y 10 m respectivamente; y los satélites Ikonos, Worldview tienen resoluciones altas de 1 m y 31 cm respectivamente (Navarro *et al*.,2024).
- Resolución espectral: Es la capacidad de los sensores para captar la radiación de diferentes bandas espectrales (Arbelo *et al*, 2012). Se prefiere el uso de imágenes multiespectrales o hiperespectrales ya que "[…] cuantas más bandas incluya el sensor, mayor será la información disponible, ya que cada banda recoge una variable distinta para la caracterización de la superficie cubierta" (Navarro *et al.,* 2024, p. 143).
- Resolución radiométrica: Es "la cantidad mínima de energía requerida para incrementar el valor de un píxel en un nivel digital (ND) […] Asimismo, la resolución radiométrica en imágenes digitales es comparable al número de tonos de gris en una fotografía en blanco y negro, ya que ambos se relacionan con el contraste." (Arbelo *et al*., 2012, p.19). Además, "Cuanto mayor sea la precisión radiométrica, mayor será la cantidad de información (respuesta espectral) que se puede capturar en la imagen." (Navarro *et al*., 2024, p. 146).
- Resolución temporal: "La resolución temporal indica el intervalo en tiempo entre cada imagen adquirida por la plataforma para un mismo punto" (Navarro *et al*., 2024, p. 146). Por ejemplo, los satélites meteorológicos tienen mayor resolución temporal ya que tienen una frecuencia diaria, a diferencia de los satélites Landsat que tienen una frecuencia mayor (Arbelo *et al*., 2012).

2.2.4 Imagen satelital

Son el producto de la captación de la radiación electromagnética por parte de los sensores remotos. Las características de estas dependen del objetivo y las características de cada satélite (Gallardo & Montes, 2021). "[…] las imágenes pueden ser caracterizadas a partir de tres parámetros: espacial, espectral y radiométrica. Los parámetros son los que definen las aplicaciones de las imágenes satelitales en las diferentes órbitas" (Witting, 2019, p. 27). Se clasifican en:

- Imagen multiespectral (MS): "Se trata de sensores multicanal con un número reducido de bandas de longitud de onda estrecha. Más recientemente se han incorporado los sensores hiperespectrales, que recogen información de múltiples bandas (entre 10 y 200 bandas espectrales)." (Navarro *et al*., 2024, p. 46). En este grupo se encuentran los sensores de resolución espacial baja como MODIS; los de resolución media como Landsat y SPOT; y sensores con resolución espacial alta como las fotografías aéreas digitales (ortofotos) (Navarro *et al*., 2024).
- Imagen hiperespectral (MS): "Los sensores hiperespectrales están diseñados para registrar centenares de longitudes de onda […] son especialmente útiles en aplicaciones forestales debido a su capacidad para proporcionar información detallada y precisa sobre las propiedades físicas y químicas de la vegetación." (Navarro *et al*., 2024, p. 148 - 149).

2.2.4.1 Programa Landsat.

Fue desarrollado por la Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio (NASA) y el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS) para obtener imágenes e información para el estudio y seguimiento de los cambios globales. Después de más de 50 años este programa ha puesto en órbita 8 satélites (Ver Tabla 1). Tal como se observa en la Figura 2 el más reciente fue Landsat 9. Además, brindan imágenes multiespectrales ya que tienen 7, 8 y 11 bandas; y cuentan con resoluciones espaciales de 15, 30, 60 y 120 m (Idrogo, 2022).

Tabla 1 Satelites Landsat

Satélite	Fecha de lanzamiento	Altitud aproximada	Sensores	Estado
Landsat 1	23 de julio de 1972	900 km	Return Beam Vidicon (RBV) y Multispectral Scanner (MSS)	Retirado el 06 de enero de 1978
Landsat 2	22 de enero de 1975	900 km		Retirado el 05 de febrero de 1982
Landsat 3	05 de marzo de 1978	900 km		Retirado el 07 de setiembre de 1983
Landsat 4	16 de julio de 1982	705 km	Thematic Mapper (TM), MSS	Retirado el 15 de junio de 2001
Landsat 5	01 de marzo de 1984	705 km		Retirado el 01 de enero del 2013
Landsat 6	Su lanzamiento falló el 5 de octubre de 1993	-	Enhanced Thematic Mapper (ETM)	La puesta en órbita no fue exitosa
Landsat 7	15 de abril de 1999	705 km	Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+)	En funcionamiento
Landsat 8	11 de febrero de 2013	705 km	Operational Land Imager (OLI) y Thermal Infrared Sensor (TIRS)	En funcionamiento
Landsat 9	27 de setiembre de 2021	705 km	Operational Land Imager 2 (OLI-2) y Thermal Infrared Sensor 2 (TIRS-2)	En funcionamiento

Fuente. Adaptado de NASA (s.f). https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/

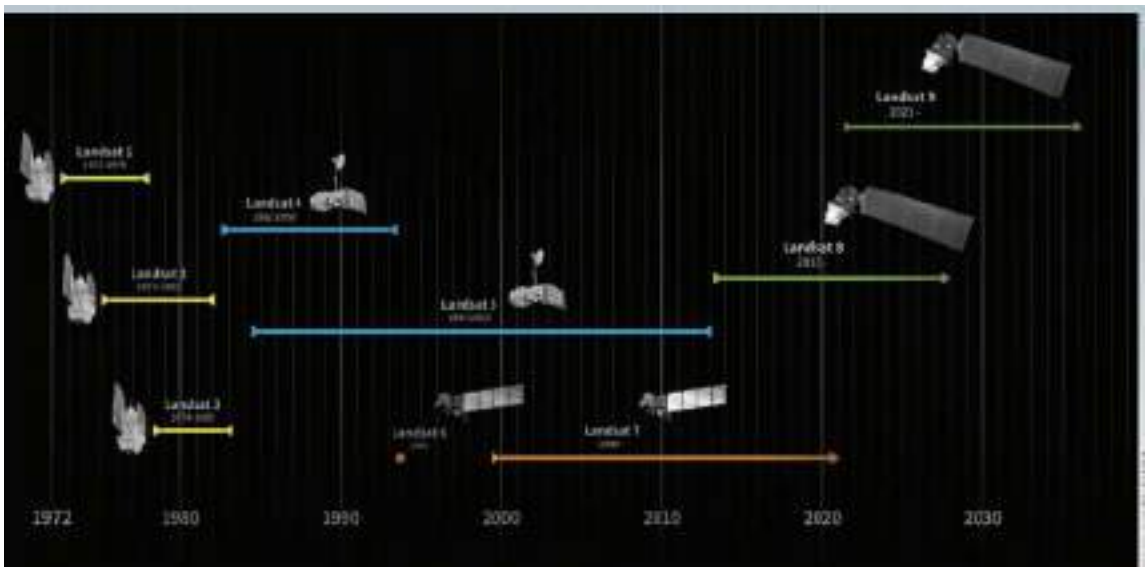


Figura 2. Línea de tiempo de los satélites del programa Landsat
*Fuente***.** NASA (s.f.). https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/landsat-9/

En esta investigación se usaron imágenes Landsat 5 de los años 1990 y 2003; y Landsat 8 para el año 2013 y 2023. El satélite Landsat 5 se lanzó en el año 1984 y sus imágenes tienen resolución espacial de 30 m, excepto la banda Termal con resolución de 120 m (ver Tabla 2). Por su parte, el satélite Landsat 8 se lanzó el año 2013, cuenta con 8 bandas de 30 m, 1 banda de 15 m y 2 bandas de 30 m (ver Tabla 3). Se precisa que en esta investigación se usaron las bandas de 30 m.

Tabla 2 Características de la imagen satelital Landsat 5

Número	Banda	Sensor	Longitud de onda (µm)	Resolución espacial (m)
1	Azul	TM	0.45-0.52	30
2	Verde	TM	0.52-0.60	30
3	Rojo	TM	0.63-0.69	30
4	Infrarrojo cercano (NIR)	TM	0.76-0.90	30
5	Onda Corta Infrarroja (SWIR 1)	TM	1.55-1.75	30
6	Termal	TM	10.41-12.5	120
7	Onda Corta Infrarroja (SWIR 2)	TM	2.08-2.35	30

Fuente. Adaptado de NASA (s.f.). https://landsat.gsfc.nasa.gov/thematic-mapper/

Tabla 3 Características de la imagen satelital Landsat 8

Número	Banda	Longitud de onda (µm)	Sensor	Resolución espacial (m)
1	Ultra Azul (costero/aerosol)	0.433–0.453	OLI	30
2	Azul	0.450–0.515	OLI	30
3	Verde	0.525–0.600	OLI	30
4	Rojo	0.630–0.680	OLI	30
5	Infrarrojo Cercano (NIR)	0.845–0.885	OLI	30
6	Onda Corta Infrarroja (SWIR) 1	1.560–1.660	OLI	30
7	Onda Corta Infrarroja (SWIR) 2	2.100–2.300	OLI	30
8	Pancromática	0.500–0.680	OLI	15
9	Cirrus	1.360–1.390	OLI	30
10	Infrarrojo Térmico 1	10.6-11.2	TIRS	100
11	Infrarrojo Térmico 2	11.5-12.5	TIRS	100

Fuente. Adaptado de NASA (s.f). https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/landsat-8/landsat-8-bands/

2.2.5 Preprocesamiento de la imagen satelital

Las imágenes tienen ciertos errores causados por factores externos climáticos (humedad, nubosidad u otras condiciones atmosféricas) y características propias del satélite por ende requieren un preprocesamiento. Se realiza la calibración radiométrica, geométrica y/o atmosférica (Granja, 2020).

- Corrección geométrica: Según Chuvieco *et al*. (2011) es la georreferenciación realizada a través de puntos de control para poder asignar a los píxeles la coordenada geográfica correspondiente. Esto "[…] corrige las distorsiones asociadas a su adquisición, la corrección orbital y la distribución de errores en la imagen utilizando puntos de control" (Navarro *et al.,* 2024, p. 155).
- Corrección radiométrica: El procedimiento consiste en la conversión de números digitales a radiancia (Granja, 2020), esto reduce los errores o cambios que se producen en las imágenes satelitales causados por la presencia de partículas en el ambiente.
- Corrección atmosférica: Esta corrección "Está orientada a reducir o eliminar las distorsiones que introduce la atmósfera en los valores de radiancia y generar, así, la forma espectral más cercana a la específica de la superficie estudiada" (Navarro *et al*., 2024, p. 155). En términos generales, se realiza el ajuste de los valores o la intensidad de los píxeles que conforman una imagen para obtener valores homogéneos.

2.2.6 Procesamiento de imágenes satelitales

2.2.6.1 Generación de información complementaria.

2.2.6.1.1 Índices de teledetección

Para esta investigación se calcularon los índices de forma complementaria para la delimitación de áreas de entrenamiento que se usaron en la clasificación supervisada de las imágenes satelitales Landsat. "Los índices o cocientes son un conjunto de operaciones algebraicas usando dos o más bandas pertenecientes a la misma escena." (Navarro *et al*., 2024, p.138-139). En general, los índices se agrupan en: índices de vegetación y suelos,

índices de agua, índices de geología e índices de paisaje. Los que se usaron para esta investigación son:

- Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI): Los valores están en el rango de - 1 a 1, donde los valores negativos se asocian a superficies sin vegetación (nubes, agua o nieve). Mientras que, los valores cercanos a cero ya sean positivos o negativos indican que es una superficie rocosa o terreno desnudo. Por lo general los valores menores a 0.2 se interpretan como superficies sin vegetación (Toby y David, 1997, como se citó en Subia, 2020).

  > […] los resultados pueden ser influenciados por la atmósfera y por el suelo; sin embargo, permite entender el comportamiento de la cobertura vegetal que en su mayoría está marcado por su ciclo fenológico y otros factores como climáticos, actividad antrópica, entre otros. (Gallardo & Montes, 2021, p. 47)

  La fórmula usada para calcular el NDVI es:

$$NDVI = \frac{(\rho s_{NIR} - \rho s_{RED})}{(\rho s_{NIR} + \rho s_{RED})}$$

  Donde: "NIR es la reflectancia corregida atmosféricamente correspondiente al infrarrojo cercano y RED es la reflectancia corregida atmosféricamente correspondiente al rojo" (Gallardo & Montes, 2021, p. 47).

  Se precisa que los valores de NDVI "[…] no miden directamente el contenido de agua en la planta, sino más bien la cantidad de biomasa verde, que está relacionada con el área foliar y el contenido de clorofila" (Navarro *et al*., 2024, p.182).

- Índice de suelo desnudo (BSI): Brinda información de las áreas con escasa o sin vegetación; los píxeles varían entre -1 a 1 donde los valores positivos se interpretan como zonas de suelo desnudo, mientras que los valores negativos indican la presencia de vegetación. Las bandas usadas son NIR (Reflectancia de la banda infrarrojo cercano), SWIR-1 (Reflectancia de la banda infrarrojo de onda corta 1), RED (Reflectancia de la banda roja) y BLUE (Reflectancia de la banda azul) tal como lo mencionan (Plata & Fuentes, 2023).

$$BSI = \frac{(\rho s_{SWIR1} + \rho s_{RED}) - (\rho s_{NIR} + \rho s_{BLU})}{(\rho s_{SWIR1} + \rho s_{RED}) + (\rho s_{NIR} + \rho s_{BLU})}$$

2.2.6.2 Clasificación supervisada y no supervisada.

Se realiza para obtener información temática de la cobertura y uso de suelo, existen 2 tipos:

- Clasificación supervisada: En esta clasificación "Se definen las clases de cobertura de suelo. Se tienen los datos de referencia suficientes y se utilizan como patrones de entrenamiento para obtener las firmas generadas […]." (Lu y Weng, 2007, p. 8). Requiere que se tenga algún conocimiento del área de estudio para poder delimitar y elegir las áreas o puntos de entrenamiento, así como la cantidad de categorías. Asimismo, "El uso de áreas de interés, regiones de interés o instancias en técnicas de clasificación supervisada permite que los algoritmos aprendan a reconocer patrones y características relevantes en los datos satelitales" (Navarro *et al*., 2024, p. 177). Los algoritmos más usados son los árboles de clasificación, clasificación por mínima distancia, clasificación por paralelepípedo y clasificación de máxima verosimilitud (Navarro *et al*., 2024; Lu y Weng, 2007).
- Clasificación no supervisada: Es un proceso automático donde se clasifica la imagen en diferentes clases espectrales de acuerdo con su grado de separabilidad espectral. El usuario indica la cantidad de clases y también puede editar o agrupar las clases obtenidas por defecto (Lu y Weng, 2007). "Las técnicas de clasificación de imágenes satelitales no supervisada más comunes son ISODATA, Support Vector Machine (SVM, en su versión automática) y los Clúster jerárquicos (K-Means)" (Navarro *et al*., 2024, p. 176).

Existen diversos algoritmos de clasificación supervisada que se agrupan en métodos tradicionales y métodos de machine learning. Tal como se observa en la Tabla 4) cada uno presenta ventajas y limitaciones.

Tabla 4 Ventajas y desventajas de los métodos de clasificación de imágenes satelitales

Tipo	Ventajas	Inconvenientes
Métodos basados en técnicas paramétricas convencionales		
Minimun Distance Classification o distancia mínima	• Calcula los espectros medios (reflectividad media) de cada clase predefinida como un centroide en un espacio de variables, y asigna cada píxel a un grupo que tiene la menor distancia. • En este espacio de variables se calcula la distancia entre un pixel cada una de las clases.	• Sobreclasifica la imagen, es decir ningún píxel queda sin clasificar. Es preferible dejar áreas sin clasificar que clasificarlas sin garantías. • No se tiene en cuenta la desviación típica de cada una de las bandas para cada una de las clases, así una clase con una baja desviación típica no debería absorber píxeles alejados de su centroide. • Los píxeles de suelo muestran una alta dispersión (especialmente en cuanto a reflectividad en el rojo debido a las diferentes composiciones mineralógicas).
Maximum Likelihood Classification (MLC) o Clasificación de Máxima Verosimilitud	• Es un método basado en la distribución de probabilidad, aceptando su comportamiento normal, para asignar la probabilidad de que un píxel cualquiera pertenezca a cada una de las clases. El píxel se asigna de este modo a la clase a la que es más probable que pertenezca. • Este método puede usarse de forma automática, o puede establecerse algún criterio que permita asignar pixeles a una clase solo si la probabilidad correspondiente es superior a determinado umbral. Permite, por otro lado definir algún tipo de criterio para medir la calidad de la asignación, por ejemplo, la diferencia entre la máxima probabilidad y la siguiente.	• La hipótesis de que los datos de reflectividad siguen una distribución normal no siempre se cumple y debería verificarse. • Este método es eficaz para clasificar imágenes, pero es laborioso, y si los datos reales de campo (áreas de entrenamiento) son insuficientes los resultados son deficientes.
Métodos de Machine Learning basados en técnicas no paramétricos		
Support vector machine o Máquinas de soporte (SVM)	Utilizan múltiples variables predictoras, y en ocasiones, también usan variables auxiliares (modelos digitales del terreno).	• El proceso de entrenamiento demanda mucho tiempo. • Dificultad para entender la estructura de análisis de los datos. • Depende de la elección de los parámetros que hace el analista.
Random Forest (RF)	Utiliza árboles de decisión como clasificadores base.	Es sensible a ligeras variaciones de los datos de entrada, por ejemplo, cambios en el entrenamiento.

Fuente. Adaptado de Navarro *et al*., 2024

Según el INAIGEM (p.56, 2023), “La elección de una metodología adecuada en teledetección depende de la disponibilidad de datos y los objetivos de estudio […]”. En ese sentido, en esta investigación de forma preliminar se evaluaron 3 métodos disponibles

en el programa ENVI 5.6: Support Vector Machine o Máquinas de Soporte (SVM); Minimun Distance Classification o Distancia Mínima; y Maximum Likelihood Classification (MLC) o Clasificación de Máxima Verosimilitud. Se precisa que este último se eligió para la clasificación de todas las imágenes satelitales ya que tuvo mejores resultados según el índice de Kappa.

Tal como se describió anteriormente, todos los algoritmos presentan ventajas y desventajas. Sin embargo, es importante precisar que el método elegido ha presentado buenos resultados. Por ejemplo, en las investigaciones de Aguilar y Orosco (2023), Idrogo (2022), Cabrera (2022), Pérez (2021) y Medina (2021) las imágenes clasificadas obtuvieron valores de Kappa mayores a 0.72.

2.2.7 Evaluación de la exactitud temática

Según el MINAM (2014) esta etapa "Comprende el desarrollo de la matriz de confusión y el cálculo de las diversas medidas de exactitud, precisión y error" (p.13.). En ese sentido. Esta matriz permite comparar los resultados de la clasificación supervisada con información real del área de estudio a través de puntos o áreas de validación. Es decir, es una herramienta que permite evaluar la confiabilidad de la clasificación supervisada, errores de comisión y errores de omisión (MINAM, 2014). Tal como se observa en la Tabla 5, los valores en la diagonal representan clasificaciones correctas, mientras que los valores fuera de ella indican errores o desviaciones.

Tabla 5 Matriz de Confusión

		Resultados de Referencia						
Resultados de clasificación		Referencia 1	Referencia 2	....	Referencia n	**Total**	Exactitud usuario	Error comisión
	Clase 1	a_{11}	a_{12}	....	a_{1n}	a_{1+}	a_{11}/a_{1+}	$1 - a_{11}/a_{1+}$
	Clase 2	a_{21}	a_{22}	....	a_{2n}	a_{2+}	a_{22}/a_{2+}	$1 - a_{22}/a_{2+}$
	....	....	....	....	....	....	....	....
	Clase n	a_{n1}	a_{n2}	....	a_{nn}	a_{n+}	a_{nn}/a_{n+}	$1 - a_{nn}/a_{n+}$
	Total	a_{+1}	a_{+2}	....	a_{+n}	n		
	Exactitud Productor	a_{11}/a_{+1}	a_{22}/a_{+2}	....	a_{nn}/a_{+n}			
	Error Omisión	$1 - a_{11}/a_{+1}$	$1 - a_{22}/a_{+2}$	....	$1 - a_{nn}/a_{+n}$			

Fuente. Zumaeta (2019).

A partir de la matriz de confusión se calculan los 2 índices de evaluación de exactitud temática que se describen a continuación:

2.2.7.1 Índice de Kappa.

El índice de Kappa "Es una medida que evalúa la concordancia entre las clasificaciones reales y las predicciones del modelo, teniendo en cuenta la proporción de acuerdos que podrían haber ocurrido por azar." (Navarro *et al*., 2024, p. 185). Los valores oscilan entre 0 y 1; siendo los mayores a 0.61 indicadores de una clasificación supervisada considerada o perfecta (ver Tabla 6).

De igual forma, según MINAM (2014), "Es una medida de la diferencia entre la exactitud lograda en la clasificación con un software y la exactitud de lograr una clasificación correcta con una clasificación visual (en campo o con imágenes de alta resolución)" (p.20). Este índice se calcula usando la siguiente fórmula:

$$K = \frac{(Po - Pe)}{(1 - Pe)}$$

Donde:

Po= Número de aciertos / Número total de clases

Pe= Cálculo generado desde la matriz de confusión

Tabla 6 Rango de valores del índice de Kappa

Coeficiente de Kappa (k)	Fuerza de concordancia
0.00	Pobre
0.01 -0.20	Leve
0.21-0.40	Aceptable
0.41-0.60	Moderada
0.61-0.80	Considerada
0.81-1.00	Casi perfecta

Fuente. MINAM (2014).

2.2.7.2 Índice de desacuerdo de Cantidad y desacuerdo de Asignación (QADI).

Según Pontius Jr & Millones (2011); y Feizizadeh *et al*. (2022) el índice de Kappa se determina en base a la matriz de confusión y es el más usado en el área de teledetección. Sin embargo, tiene limitaciones como la sensibilidad a la distribución de datos y la dificultad para interpretar errores de cantidad y asignación. Por ello Pontius Jr & Millones (2011) dieron a conocer los parámetros Quantity Disagreement (QD)/desacuerdo de

cantidad y Allocation Disagreement (AD)/desacuerdo de asignación que indican el nivel de desacuerdo y diferencia entre un resultado de clasificación y los datos de entrenamiento. Tal como se observa en la Tabla 7, los valores de QADI varían entre 0 y 1, donde el valor más cercano a cero indica muy alta confianza y muy bajo desacuerdo; mientras que los valores más cercanos a uno indican muy baja confianza y falta de precisión.

Feizizadeh *et al*. (2022) realizaron una herramienta para calcular el índice QADI en el programa ArcGIS que permite calcular dicho valor y obtener un gráfico. Por ejemplo, en la Figura 3 el punto negro por encima de la línea diagonal amarilla y cerca del eje Y (desacuerdo de asignación) indica que el error de asignación es la principal razón de desacuerdo. El valor QADI indica una "clasificación accidental" y el error de etiquetado (desacuerdo de asignación) tiene una alta influencia en el desacuerdo.

Tabla 7. Rango de valores del índice QADI

QADI Scale	Color Scheme	Classification Accuracy
0.00 ≤ QADI < 0.07	Blue	Very high confidence/(Very low disagreement)
0.07 ≤ QADI < 0.12	Green	High confidence/(Low disagreement)
0.12 ≤ QADI < 0.20	Yellow	Moderate confidence/(Moderate disagreement)
0.20 ≤ QADI < 0.30	Orange	Low confidence/(High level of disagreement)
0.30 ≤ QADI ≤ 1	Red	Very low confidence/(lack of accuracy)

Fuente. Feizizadeh *et al*. (2022).
Nota: Very high confidence/ Very low Disagreement: Muy alta confianza / muy bajo desacuerdo
High confidence/ Low Disagreement: Alta confianza / bajo desacuerdo
Moderate confidence/ Moderate disagreement: Moderada confianza / moderado desacuerdo
Low confidence/ High level of disagreement: Poca confianza / Alto nivel de desacuerdo

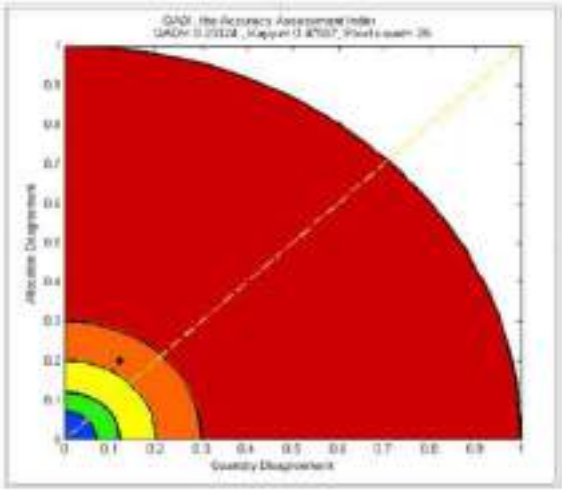


Figura 3. Gráfico del índice de QADI
Fuente. Feizizadeh *et al.* (2022).

2.2.8 Análisis del cambio de cobertura y uso de suelo

Permite identificar cuánto, dónde y cómo se presentan las transiciones entre coberturas en diferentes intervalos de tiempo. Parte del análisis de la matriz de transición.

2.2.8.1 Matriz de transición.

Es una matriz de doble entrada que permite cuantificar los cambios en dos momentos diferentes que se dan en las clases o categorías de cobertura y uso de suelo identificadas. Pontius *et al*. (2004, como se citó en Zumaeta, 2019) plantean que en la Tabla 8 la celda de ganancia (Gij) indica el incremento entre la fecha inicial y final que es resultado de restar el área total de la clase j en la fecha 2 (P+j), mientras que la diagonal de la matriz nos indica que no ha existido cambios. Asimismo, la pérdida se calcula restando el área total de una clase i en la fecha inicial (celda Pi+) y las áreas sin cambio.

Tabla 8. Matriz de transición

Fecha 1	Fecha 2				Total fecha 1 (Pi+)	Pérdida (Lij)
	Clase 1	Clase 2	....	Clase j		
Clase 1	P11	P12	....	P1j	P1+	P1+ - P11
Clase 2	P21	P22	....	P2J	P2+	P2+ - P22
....	....	....	....	....	....	....
Clase i	Pi1	Pi2	....	Pij	Pi+	Pi+ - Pij
Total fecha 2 (P+ j)	P+1	P+2	....	P+j	1	
Ganancia (Gij)	P+1 – P11	P+2 – P22	....	P+j - Pij		

Fuente. Zumaeta (2019).

2.2.8.2 Análisis de intensidad de cambio.

Aldwaik & Pontius Jr (2012) propusieron el análisis de intensidad de cambio que se realiza en base a las matrices de transición. Este análisis jerárquico permite analizar los cambios en 3 niveles: nivel de intervalo, nivel de categoría y nivel de transición. Este enfoque es relevante ya que no considera solo el tamaño de los cambios, sino también el tamaño de las clases (Aldwaik & Pontius Jr, 2012). Los niveles mencionados también han sido descritos por Farfán *et al.* (2015), continuación se presenta con mayor detalle lo descrito por esos autores:

2.2.8.2.1 Intensidad de cambio a nivel de intervalo

Identifica el cambio que se da en los diferentes intervalos de tiempo. Se calcula la tasa de cambio anual de los intervalos de tiempo y se realiza la comparación con una tasa

de cambio uniforme que resulta de un escenario hipotético donde los cambios anuales se distribuyen de manera homogénea en todo el periodo de evaluación. De acuerdo con las tasas de cambio obtenidas, se puede indicar si hubo un cambio rápido o lento.

2.2.8.2.2 Nivel de categoría

Analiza la ganancia o pérdida bruta respecto a la superficie inicial y final de las diferentes categorías identificadas. Se realiza la comparación de la intensidad de cambio anual calculado con la intensidad uniforme de cambio que resulta de un escenario hipotético donde el cambio se distribuye de forma homogénea en toda el área. En base a esa comparación, se considera como categoría activa si se presenta una intensidad de cambio mayor a la intensidad de cambio uniforme de lo contrario es una categoría latente o inactiva.

2.2.8.2.3 Nivel de transición

Presenta información detallada de los cambios entre categorías, toma en cuenta la superficie disponible para la transición y brinda información sobre el patrón de transición. Se considera como una transición uniforme donde aquella categoría gana o pierde superficie a otras categorías proporcionalmente al tamaño que tiene cada una. Se considera como transición de forma preferencial o dirigida cuando se identifica que la intensidad de la transición observada es mayor que la intensidad uniforme, caso contrario se menciona que la categoría evita esta transición.

2.2.9 Proyección de cobertura y uso de suelo

Según Rosero (2018):

> La proyección tiene como fin determinar áreas con mayor susceptibilidad a ser afectadas por procesos de conversión de ecosistemas naturales, esto consiste en la implementación de un modelo empírico que caracterice los procesos de conversión de la vegetación natural observados en el periodo aproximado. Además, cabe mencionar que la proyección cumple con el objetivo de dotar de información sobre la magnitud, estructura, crecimiento, distribución de la población y de sus características económicas, sociales y demográficas, que sirva de base para la elaboración de planes generales de desarrollo y la formulación de programas y proyectos a cargo de organismos de los sectores público y privado. (p. 48)

En general hay dos enfoques con los que actualmente trabajan los modelos, top - down (de arriba hacia abajo) y bottom-up (de abajo hacia arriba); el primero usa datos obtenidos de las imágenes satelitales, variables explicativas y se basa en cambios históricos para realizar escenarios futuros. Mientras que el segundo usa información primaria como la aplicación de encuestas a agricultores u otros grupos de interés (Gaur & Singh, 2023). Tal como se observa en la Tabla 9, los modelos presentan ventajas y desventajas, por ende, la elección dependerá de los objetivos de la investigación e información disponible.

Tabla 9. Modelos de proyección del cambio de cobertura y uso de suelo

Tipo de modelo	Descripción	Ventajas	Desventajas	Supuestos subyacentes	Software
Modelos estadísticos	"Establecen una relación matemática entre las variables explicativas y los patrones de cambio de cobertura y uso de suelo." (Gaur & Singh, 2023, p.5). Los modelos más usados son: 1. Basados en regresión: Regresión lineal, regresión logística y modelos aditivos generalizados. 2. Estocásticos: Cadenas de Markov.	Se combinan con otros modelos como los autómatas celulares o algoritmos genéticos y son fáciles de implementar y son buenos para generalizar (Gaur & Singh, 2023).	No es recomendable para modelar escenarios donde se incluyan las decisiones basadas en el comportamiento humano (Gaur & Singh, 2023).	1. Regresión logística 2. Markov 3. Modelado lineal generalizado 4. Modelo aditivo generalizado	DYNAMICA
Modelos de autómatas celulares (CA)	Consideran el área de estudio como un conjunto de píxeles, celdas o parcelas que van a cambiar en base a ciertas reglas de transición y las características de las celdas vecinas. Además, se basan en patrones históricos (Gaur & Singh, 2023).	Se pueden incorporar procesos de toma de decisiones y simulan de forma eficiente el análisis espacial de cambio (Gaur & Singh, 2023).	Tiene limitaciones para simular a dinámica temporal de cambio y en el análisis espacial de cambio (Gaur & Singh, 2023).	1. Extrapolación de patrones históricos de cobertura y uso del suelo (LULC). 2. Modelo dinámico basado en autómatas celulares. 3. Modelo que simula una transformación unidireccional entre categorías LULC.	CLUE-S, CA, SLEUTH, Environment Explorer, GEOMOD
Modelo económico	Los modelos sectoriales y espacialmente desagregados son los más usados, el primero simula escenarios a escalas más grandes a diferencia (Gaur & Singh, 2023).	Identifica y mejora la confiabilidad de los procesos económicos que se relacionan con el cambio de cobertura y uso de suelo (Gaur & Singh, 2023).	Se necesita establecer supuestos sobre la estructura del mercado y los procesos económicos (Gaur & Singh, 2023).	1. Equilibro general computable (CGE) 2. Equilibrio parcial (PE)	FARM, GTAP, EPPA, ASMGHG, IMPACT. GTM FASOM GLOBIOM
Modelos híbridos	Integran uno o más modelos mencionados anteriormente para así	Son modelos con una mejor calidad ya que reducen las	-	-	Dynamica EGO, iCity.

Tipo de modelo	Descripción	Ventajas	Desventajas	Supuestos subyacentes	Software
	superar las desventajas que presentan los modelos individuales. Uno de ellos es el modelo CA -Markov (Gaur & Singh, 2023).	limitaciones de los modelos individuales (Gaur & Singh, 2023).			

Fuente. Elaboración propia a partir de Gaur & Singh (2023).

Según Gaur & Singh (2023), los modelos de Autómatas Celulares (CA) han sido usados con mayor frecuencia; sin embargo, las técnicas de aprendizaje automático (Machine Learning) como las redes neuronales están siendo aplicadas en la teledetección ya que aprenden de los patrones históricos y variables explicativas. Dentro de esta técnica se encuentra el modelo de Perceptrón Multicapa (MLP) usado en estudios del cambio de cobertura y uso de suelo.

Entre los principales programas para realizar modelos de cambio de cobertura y uso de suelo se encuentran Dinámica EGO, Land Change Modeler (LCM) del programa Terrset, entre otros. En la Tabla 10 se presenta más información sobre los diferentes programas.

Tabla 10. Software usado en la proyección de cobertura y uso de suelo

Software/ modelo	Descripción	Desarrollador	Métodos/Algoritmos utilizados	Aplicaciones comunes
DYNAMICA EGO (Environment for Geoprocessing Objects)	Es un modelo de cambio y cobertura de suelo y también un programa (Gaur & Singh, 2023).	Centro de Sensoriamento Remoto de la Universidad Federal de Minas Gerais (Brasil)	Algebra de mapas, técnicas de autómatas celulares (CA) y estadísticas tabulares y matrices de cadenas de Markov (Gaur & Singh, 2023).	Crecimiento urbano, emisiones de carbono, deforestación e incendios (Gaur & Singh, 2023).
Land Change Modeler (LCM) - Terrset	Disponible en el programa Terrset. Relaciona las variables explicativas y los cambios de uso de suelo (Gaur & Singh, 2023).	Clark Labs	Utiliza los algoritmos de Perceptrón Multicapa (ML), regresión logística (estadístico) y SimWeight (ML). Además, usa cadenas de Markov para simular la cantidad y frecuencia temporal de los cambios (Gaur & Singh, 2023).	Cambio de cobertura y uso del suelo, REDD (Reducción de Emisiones por Deforestación y Degradación de los Bosques), cambio climático, crecimiento urbano, erosión, entre otros (Gaur & Singh, 2023).

Software/ modelo	Descripción	Desarrollador	Métodos/Algoritmos utilizados	Aplicaciones comunes
SLEUTH	Este modelo considera las áreas urbanas como organismos vivos, entrenados por reglas de transición que afectan los cambios dentro del modelo como bucles anidados (Gaur & Singh, 2023).	Keith C. Clarke en la Universidad de California, Santa Bárbara	Modelo basado en autómatas celulares (CA). Utiliza reglas de crecimiento y ejecuta iteraciones Monte Carlo (Gaur & Singh, 2023).	Crecimiento urbano, incendios, biodiversidad, hábitats (Gaur & Singh, 2023).
Pluggins MOLUSCE y SCP	Pluggins disponibles en QGIS. La sigla MOLUSCE significa Methods of Land Use Change Evaluation y SCP, Semi-Automatic Classification Plugin (Gaur & Singh, 2023).	Diversos	-	Procesamiento de imágenes satelitales, análisis y proyección del cambio de cobertura y uso del suelo (Gaur & Singh, 2023).

Fuente. Elaboración propia a partir de Gaur & Singh (2023).

Es importante precisar que no hay un modelo o programa perfecto, por lo que su uso depende principalmente de las características de la investigación, datos disponibles, del proceso de modelado: y de la escala tanto espacial como temporal (Gaur & Singh, 2023). Considerando lo descrito anteriormente, se utilizó la herramienta Land Change Modeler (LCM) disponible en el programa Terrset que permitió elaborar modelos híbridos donde integra modelos de redes neuronales (Perceptrón multicapa/MLP Neural Network y Simweight) o modelo estadístico (regresión logística) con el modelo de Markov (Gaur & Singh, 2023). En otras palabras, relaciona variables explicativas o impulsores de cambio con las transiciones de la cobertura y uso de suelo usando modelos de red neuronal o estadístico; y proyecta los escenarios usando el modelo de Markov (cadena de Markov) (Morales, 2021). A continuación, se presenta más detalle sobre las Cadenas de Markov que son parte del módulo Land Change Modeler (LCM) del programa Terrset.

2.2.9.1 Cadenas de Markov.

Las cadenas de Markov "Es el método más útil para modelar procesos estocásticos y de evolución probabilística, cuando se conoce solamente la situación presente" (Aguilar

y Orosco, 2023, p.23). "Una cadena de Markov es un sistema que evoluciona a lo largo del tiempo dentro de un conjunto de estados. Se caracteriza por que la probabilidad de que el sistema evolucione a un estado determinado depende exclusivamente del estado en que se encuentra en el momento presente" (Fonollosa, *et al.*, 2016. p. 21). En otras palabras, un proceso estocástico (x) tiene la propiedad Markoviana cuando el evento a predecir depende solo del estado actual mas no de los eventos pasados a este, por ello se menciona que este proceso no tiene memoria o tiene memoria limitada (Aguilar y Orosco, 2023).

Se presenta la ecuación 1 de la probabilidad condicional (*P*) de la sucesión de observaciones X_1, X_2 hasta X_n llamada proceso estocástico. Donde X_1 define el estado inicial del proceso, *Xn* define el estado final del proceso en el tiempo y *Sn* es el valor de la observación (Lara, 2014).

$$P(X_{n+1} = s_{n+1)}|X_1 = s_1, X_2 = s_2, \dots, X_n = s_n) \dots\dots \text{Ec. (1)}$$

Dado que en una cadena de Markov, considera solo el estado actual para determinar el evento futuro, la probabilidad del estado futuro X_{n+1} no depende de los eventos anteriores X_1, X_2, .., X_{n-1} solo del estado actual Xn (Lara, 2014) la ecuación 1 se simplificaría a la ecuación 2:

$$P\big(X_{n+1} = s_{n+1)}\big|X_1 = s_1, X_2 = s_2, \dots, X_n = s_n\big) = P(X_{n+1} = s_{n+1}|X_n = s_n \dots \text{ Ec. (2)}$$

La probabilidad de transición de las cadenas de Markov brinda información sobre la probabilidad de que un sistema cambie de un estado inicial a otro en un periodo de tiempo. "En una cadena homogénea finita con *m* posibles estados E_1, E_2, …, E_m se puede introducir la notación" (Marín, s.f., p.1) que se presenta en la ecuación 3.

$$p_{ij} = P(X_n = j|X_{n-1} = i) \dots\dots \text{ Ec (3)}$$

Los valores de p_{ij} corresponden a las probabilidades de transición del estado E_i a E_j, donde se cumplen las condiciones de $p_{ij} > 0$ y $\sum_{j=1}^{m} p_{ij} = 1$ (Marín, 2005). La primera condición interpreta cómo el estado E_i puede comunicar con el estado E_j, es decir hay una probabilidad mayor a cero de transición entre ambos. La segunda condición se interpreta como la suma de las probabilidades de transición que se dan del estado E_i hacia todos los estados E_j, suman 1.

Las probabilidades de transición se organizan en una matriz de transición T de tamaño $m \times m$ (ver ecuación 4), donde cada fila de la matriz representa la distribución de la probabilidad que suma 1 (Marín, 2005).

$$T = [p_{ij}] = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \cdots & p_{1m} \\ p_{21} & p_{22} & & p_{2m} \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ p_{m1} & p_{m2} & \cdots & p_{mm} \end{bmatrix} \text{..... Ec. 4}$$

2.2.9.2 Variables explicativas o impulsores de cambio.

Para la proyección de escenarios se evalúa el grado de influencia de diferentes variables explicativas en el cambio de cobertura y uso de suelo. Estas variables se clasifican en:

- Variables biofísicas: Características y componentes ambientales, por ejemplo, el clima (precipitación y temperatura), topografía, relieve, entre otros. (Gaur & Singh, 2023).
- Factores de proximidad: Distancia a componentes naturales y antrópicos ya que la cobertura y uso de suelo más próxima tiene mayor probabilidad de transformarse (Gaur & Singh, 2023). Incluye la distancia a vías, centros poblados o ciudades, cuerpos de agua (ríos, quebradas, manantiales, etc.) e infraestructura urbana (viviendas, tiendas comerciales, escuelas, entre otros).
- Factores socioeconómicos: Información demográfica como la tasa de alfabetización, población, producto bruto interno, crecimiento poblacional, entre otros (Gaur & Singh, 2023).
- Factores económicos: Información de impuestos, subsidios, demanda, costos de producción, entre otros (Gaur & Singh, 2023).

En el módulo Land Change Modeler del programa Terrset, como parte de la proyección de cobertura y uso de suelo al año 2033, se evaluaron diferentes variables con el coeficiente de V Cramer para identificar el grado de influencia en el cambio de cobertura y uso de suelo. Según Eastman (2012) los valores cercanos a 0 indican que existe poca o nula relación, mientras que los valores mayores a 0.15 indican una alta relación estadística (ver Tabla 11).

Tabla 11. Rangos V Cramer

Rango	Descripción
0	Sin significancia
0.01 - 0.14	Poco significativo
0.15 - 0.5	Significativo
>0.50	Muy significativo

Fuente. Eastman (2012).

Es importante precisar la complejidad de integrar en su totalidad a todas las variables que influyen en el cambio de cobertura y uso de suelo. Sin embargo, diversas investigaciones han presentado buenos resultados analizando ciertas variables como: pendiente, distancia a vías principales, distancia a vías secundarias, distancia a centros poblados, distancia a red hídrica y distancia a fuentes de agua. Por ejemplo, investigadores como Aguilar & Orosco (2023); y Cachay (2023) proyectaron escenarios al 2030 y 2052 respectivamente, usando programas como Terrset y QGIS.

Además, es posible agregar algunas variables tal como lo hizo Sopla (2023) quién realizó proyecciones al 2035 y 2050 agregando el modelo digital de elevación (DEM); mientras que Morales (2021) evaluó 17 variables distribuidas en 4 categorías (biofísicos, socio-demográficos, infraestructura y políticas públicas ambientales).

En base a lo mencionado, en esta investigación se evaluaron diferentes variables usadas ampliamente en la bibliografía, así como otras que fueron resultado del análisis de la información disponible a nivel del distrito: distancia a derechos de uso de agua (uso agrario y uso poblacional) y habilitaciones urbanas.

2.2.9.3 Validación del modelo proyectado.

La validación directa del modelamiento del cambio de cobertura y uso de suelo del año 2033 con resultados de otras fuentes bibliográficas no se realizó ya que no se encontraron investigaciones de escenarios futuros. En consecuencia, se realizó la validación retrospectiva utilizada ampliamente en investigaciones como las realizadas por Jaramillo *et al*. (2025), Bairwa *et al*. (2025), Sopla (2023), Choudhary *et al*. (2025), Kumar *et al*. (2025), Eshita *et al*. (2024) y Rojas (2025) quienes obtuvieron índices de Kappa de 0.95, 0.79, 0.82, 0.85, 0.84, 0.83 y 0.84 respectivamente que sustentan la validez del modelo de proyección que usaron.

El método de validación retrospectiva inicia con la proyección de un año que ya pasó a partir de 2 años anteriores a este. Luego, el escenario proyectado se compara con una clasificación real del año proyectado. En ese sentido, para esta investigación, se proyectó el uso de suelo del año 2023 considerando la información de los años 1990 y 2013. Posteriormente se analizó el mapa proyectado del año 2023 y el mapa de cobertura y uso de suelo del año 2023 mediante el programa Map Comparison Kit 3. Este programa permite obtener el índice de Kappa y su variación, K location que indican el grado de acuerdo entre dos mapas considerando la ubicación espacial de las clases (Eshita *et al.,* 2024).

2.3 Marco conceptual

2.3.1 Análisis multitemporal

Permite realizar comparaciones de escenarios en tiempos diferentes de forma objetiva, genera información importante para identificar cambios y así planificar el uso sostenible del territorio. "El análisis multitemporal permite tener un registro histórico de un determinado espacio, mostrando la dinámica en el área de interés. […] permite estimar y crear escenarios hacia el futuro" (Gallardo & Montes, 2021, pp. 39-40).

2.3.2 Área de referencia o entrenamiento

Es el área o superficie que se usa en la clasificación supervisada de imágenes satelitales "[…] la selección del área de referencia tiene en cuenta algunos criterios fundamentales como son: intensidad de los cambios de bosque a no bosque, accesibilidad, costos, entre otros. […]" (MINAM, 2014, p.13).

2.3.3 Métrica de separabilidad Jeffries-Matusita y la Divergencia Transformada

Método estadístico para medir la separabilidad espectral que existe entre las áreas de interés delimitadas para la clasificación supervisada. Los valores mayores a 1.8 indican una separabilidad buena, los valores de 1.51 a 1.79 corresponden a una separabilidad moderada y los valores menores a 1.5 indican una separabilidad pobre (Soubry y Guo, 2021). En la Tabla 12 se observan los valores de Jeffries-Matusita y la Divergencia Transformada.

Tabla 12. Valores de Jeffries-Matusita y Divergencia Transformada

Estadística de separabilidad	Valor umbral	Clase de separabilidad
Divergencia transformada y Distancia de Jeffries-Matusita	≥1.8	Bueno
	1.51–1.79	Moderado
	≤1.5	Pobre

Fuente. Soubry & Guo (2021).

CAPÍTULO 3 ÁREA DE ESTUDIO

3.1 Descripción del área de estudio

El distrito de El Tambo se ubica en la provincia de Huancayo, departamento de Junín y fue designado como tal en el año 1943. Es uno de los 28 distritos de la provincia de Huancayo y tiene una superficie de 147.36 km^2 (Municipalidad distrital de El Tambo, 2024) y 166.339 km^2 (16 633.92 ha) según la información espacial del INEI (2021). Sin embargo, es importante precisar que, para los cálculos en esta investigación se consideró el área de 16 632.72 ha (166.327 km^2) que resulta de cortar las imágenes satelitales Landsat (formato raster) con el límite del área distrital.

Limita al noreste con los distritos de Comas (provincia de Concepción) y Pariahuanca (provincia de Huancayo); al suroeste con los distritos de Pilcomayo y Huamancaca Chico; al este colinda con el distrito de Huancayo (provincia de Huancayo); y al oeste limita con los distritos de Quilcas, Saño, Hualhuas y San Agustín que también pertenecen a la provincia de Huancayo (ver Figura 4).

Para llegar al distrito desde la ciudad de Lima se recorre la vía nacional PE-22 hasta la Oroya, a partir de ahí se recorre la vía PE-3S hasta Jauja y finalmente la vía PE-3SB que recorre la margen izquierda del Río Mantaro (ver Figura 5). La distancia aproximada es de 343 km desde la ciudad de Lima con un tiempo promedio de viaje de 5 a 8 horas dependiendo del medio de transporte usado. Dentro del distrito, hay vías departamentales y vecinales que unen los diferentes centros poblados; y accesos existentes que se visualizan en Google Earth que aún no forman parte de la base de datos del Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC).

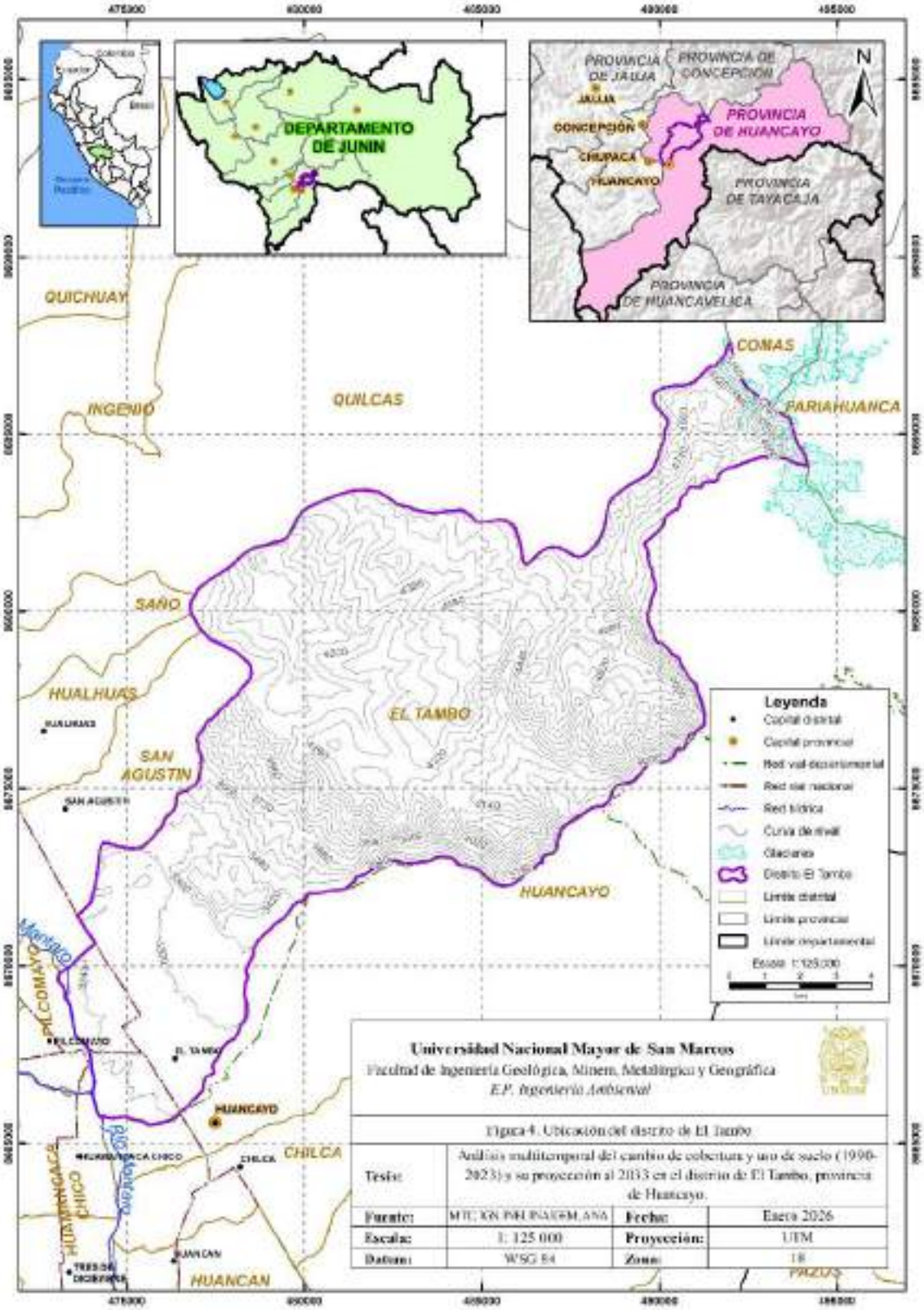


Figura 4. Ubicación del distrito de El Tambo
Fuente. Elaboración propia.

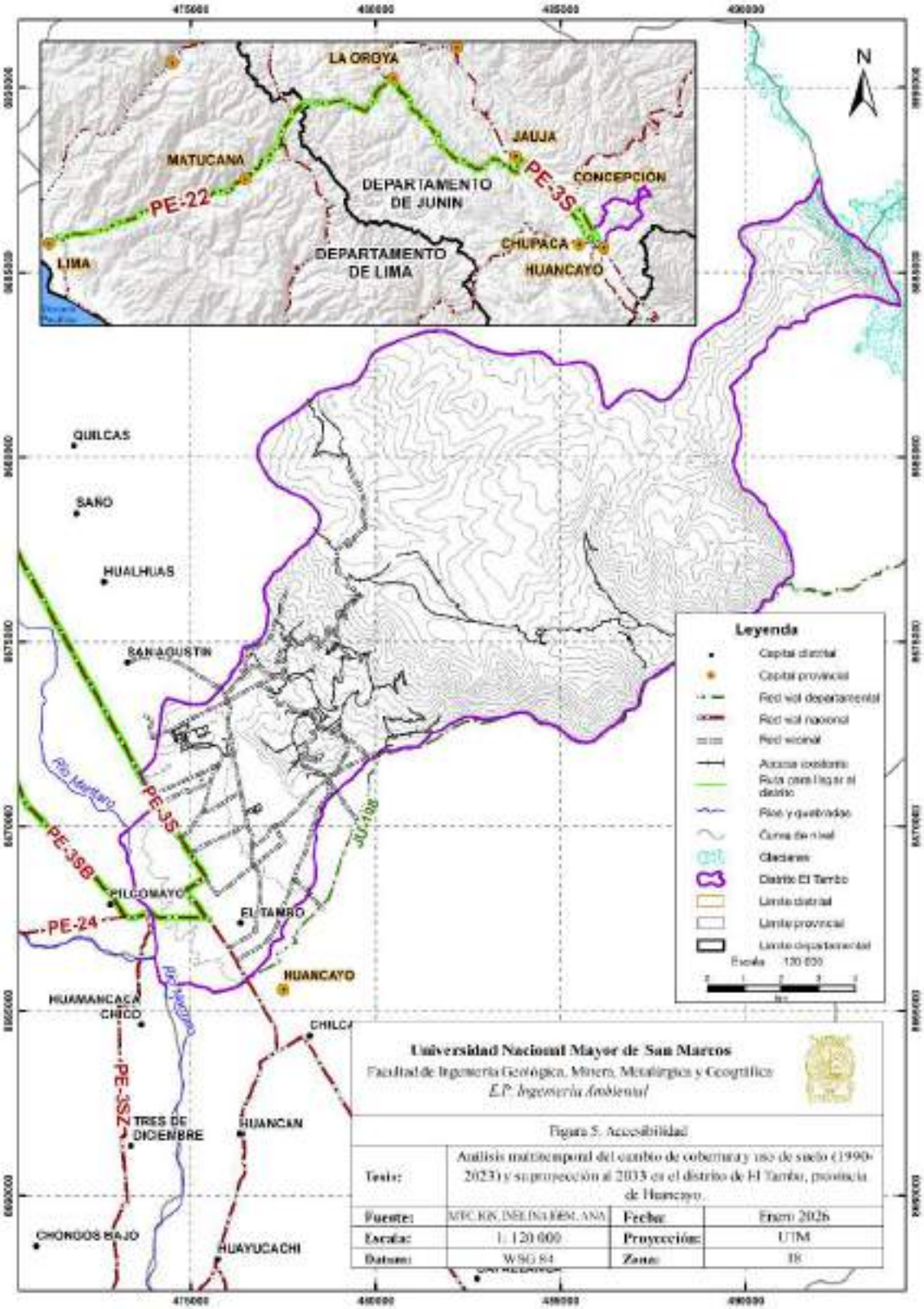


Figura 5. Accesibilidad
Fuente. Elaboración propia.

3.1.1 Altitud y pendiente

Según el análisis de la imagen DEM Alos las altitudes varían desde 3 240 m s. n. m. a 5 400 m s. n. m. (ver Figura 6). En relación con la pendiente, los rangos de 8-15 % y 15 a 25 % ocupan cerca del 50 % del distrito (ver Tabla 13 y Figura 7). Se precisa que la población se ha establecido en la parte baja, principalmente en cotas menores a 3 600 m s. n. m. y en pendientes entre 0-2 %.

Tabla 13. Rangos de pendiente en el distrito de El Tambo

Pendiente (%)	Descripción	Superficie	
		ha	%
0-2	Plana o casi nivel	1 918.1	11.53
2-4	Ligeramente inclinada	1 250.1	7.52
4-8	Moderadamente inclinada	2 295.2	13.80
8-15	Fuertemente inclinada	4 828.6	29.03
15-25	Moderadamente empinada	3 997.9	24.04
25-50	Empinada	1 761.0	10.59
50-75	Muy empinada	581.9	3.50
Total		**16 632.7**	**100.00**

Fuente. Elaboración propia.

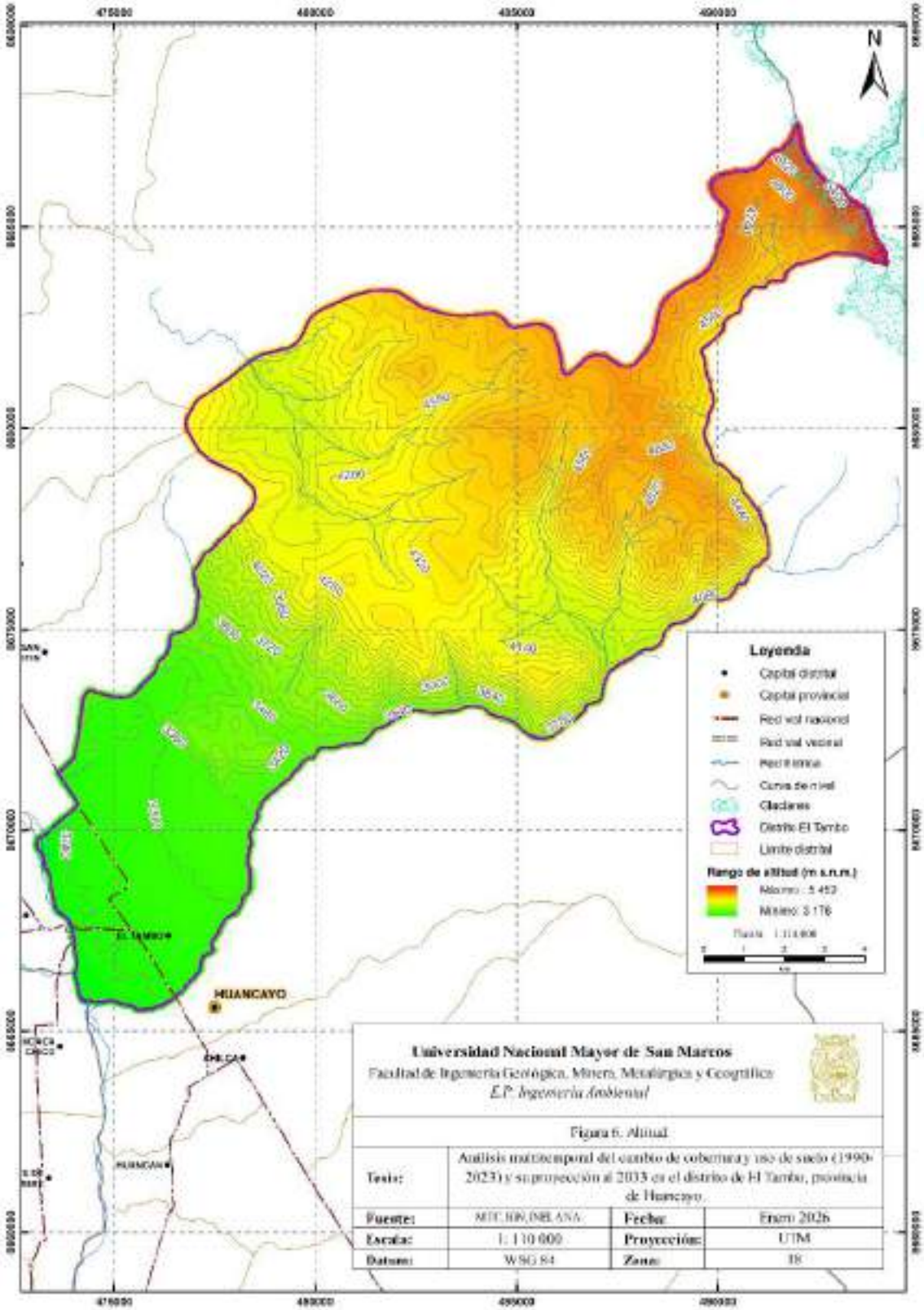


Figura 6. Altitud
Fuente. Elaboración propia.

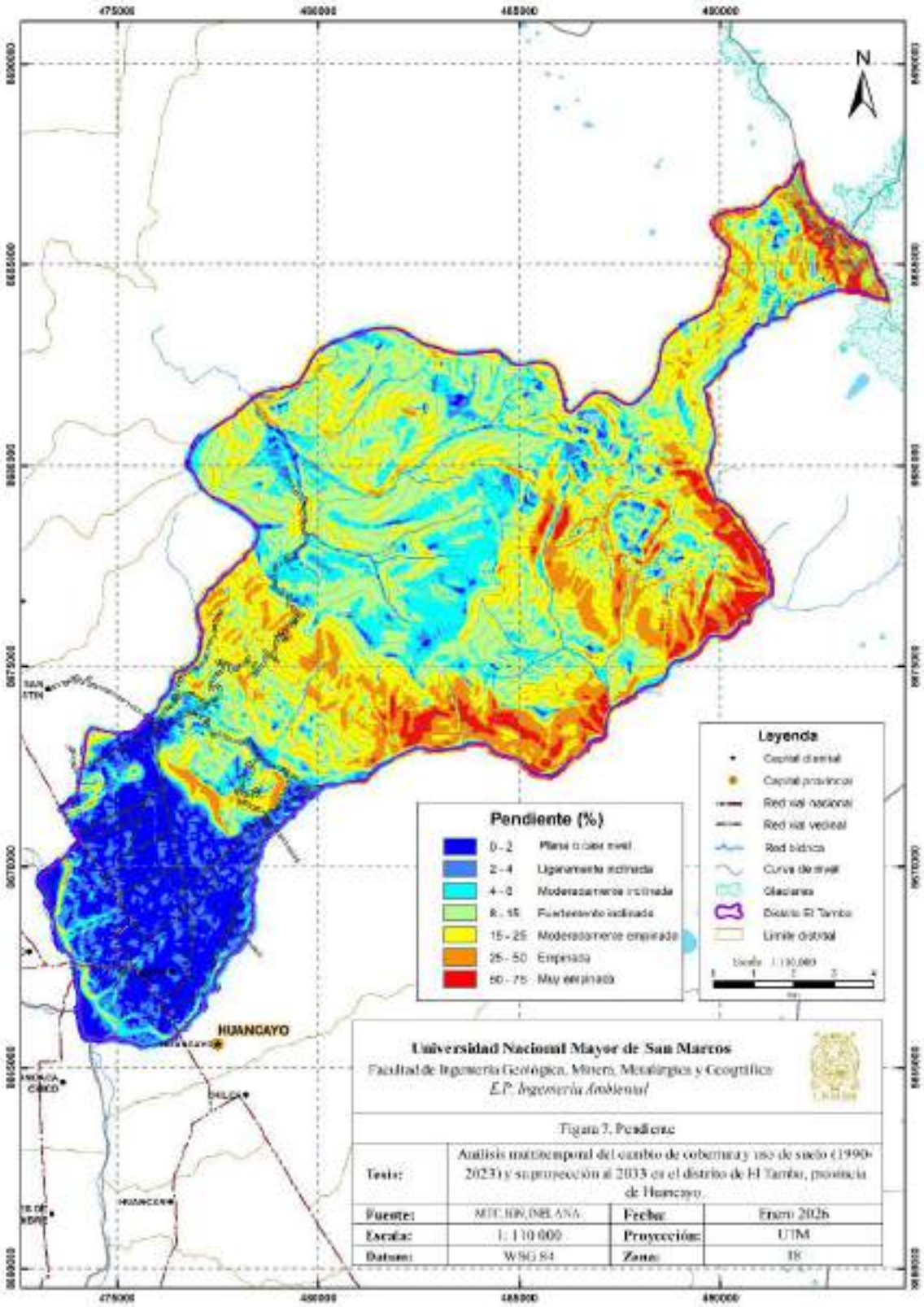


Figura 7. Pendiente
Fuente. Elaboración propia.

3.1.2 Hidrografía e hidrología

El distrito se ubica en la Cuenca del Mantaro (Código Pfafstetter nivel 4996) que tiene una superficie de 34 546.51 km^2; y se extiende por 21 provincias y 186 distritos que forman parte de los departamentos de Ayacucho, Huancavelica, Junín, Lima y Pasco (Autoridad Nacional del Agua [ANA], 2015). A nivel de subcuenca, se ubica al sureste de la subcuenca con código Pfafstetter nivel 6 "499691" y al norte de la subcuenca Medio Alto Mantaro (ver Figura 8).

A nivel local (ver Figura 9) se ubica en la margen izquierda del Río Mantaro y en la margen derecha del Río Shullcas (que marca el límite entre el distrito de El Tambo y Huancayo). El río Shullcas tiene origen nival y lacustre, ya que se genera de las lagunas Chuspicocha, Lazuntay y del Nevado Huaytapallana; y desemboca en el río Mantaro (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú [Senamhi], 2011).

3.1.3 Área de Conservación Regional Huaytapallana

Esta área se declaró como tal mediante el D.S. Nº 018-2011-MINAM, tiene una superficie de 22 406.52 ha. Abarca parcialmente 4 distritos de la provincia de Huancayo: Quilcas, Huancayo, Pariahuanca y El Tambo; y el distrito Comas de la provincia de Concepción (ver Figura 9). El nevado Huaytapallana es cabecera de cuenca de los ríos Shullcas, Tulumayo, Parihaunca y Achamayo y es de vital importancia para el abastecimiento de agua para las poblaciones locales (Gobierno Regional de Junín, 2021).

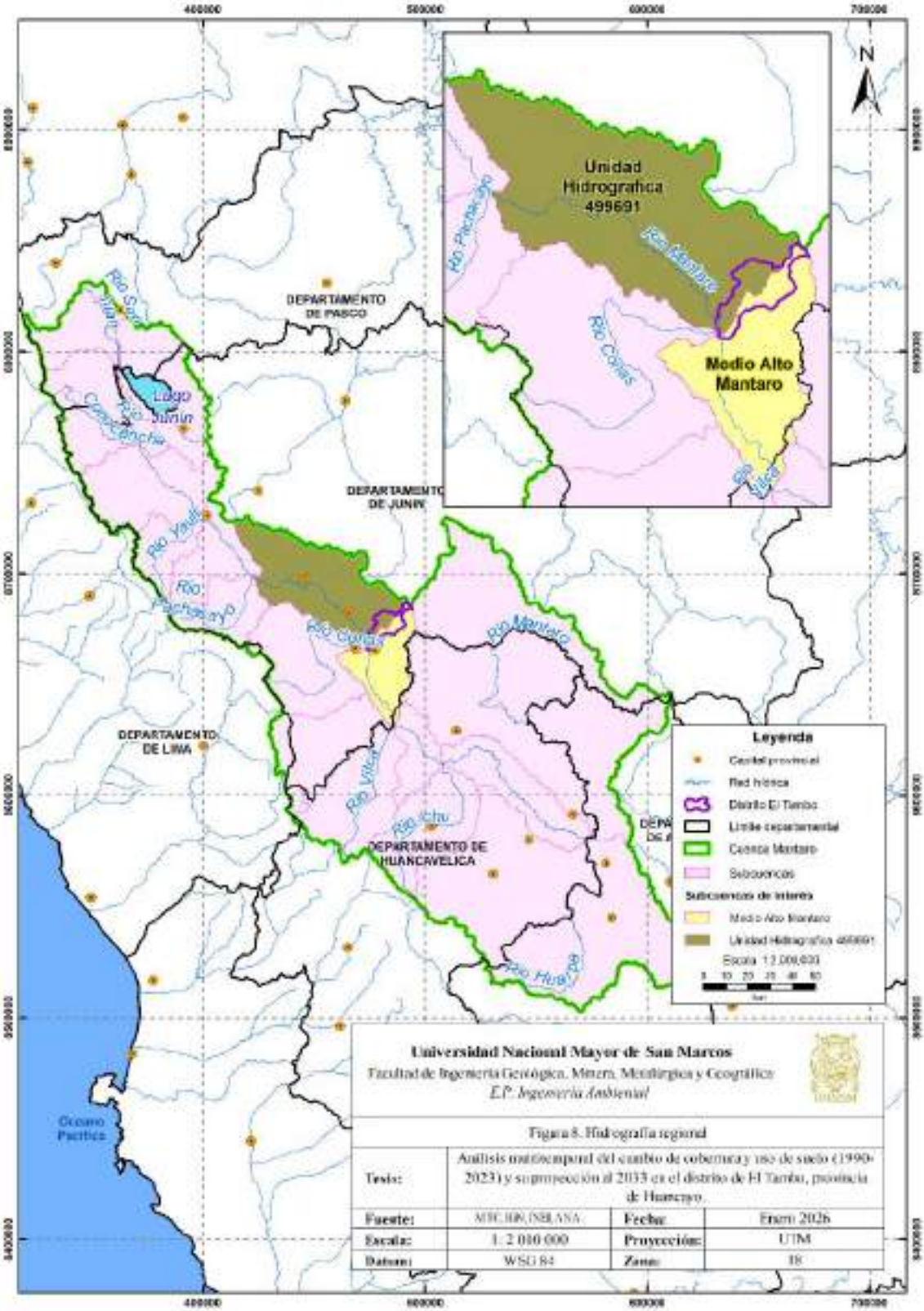


Figura 8. Hidrografía regional
Fuente. Elaboración propia.

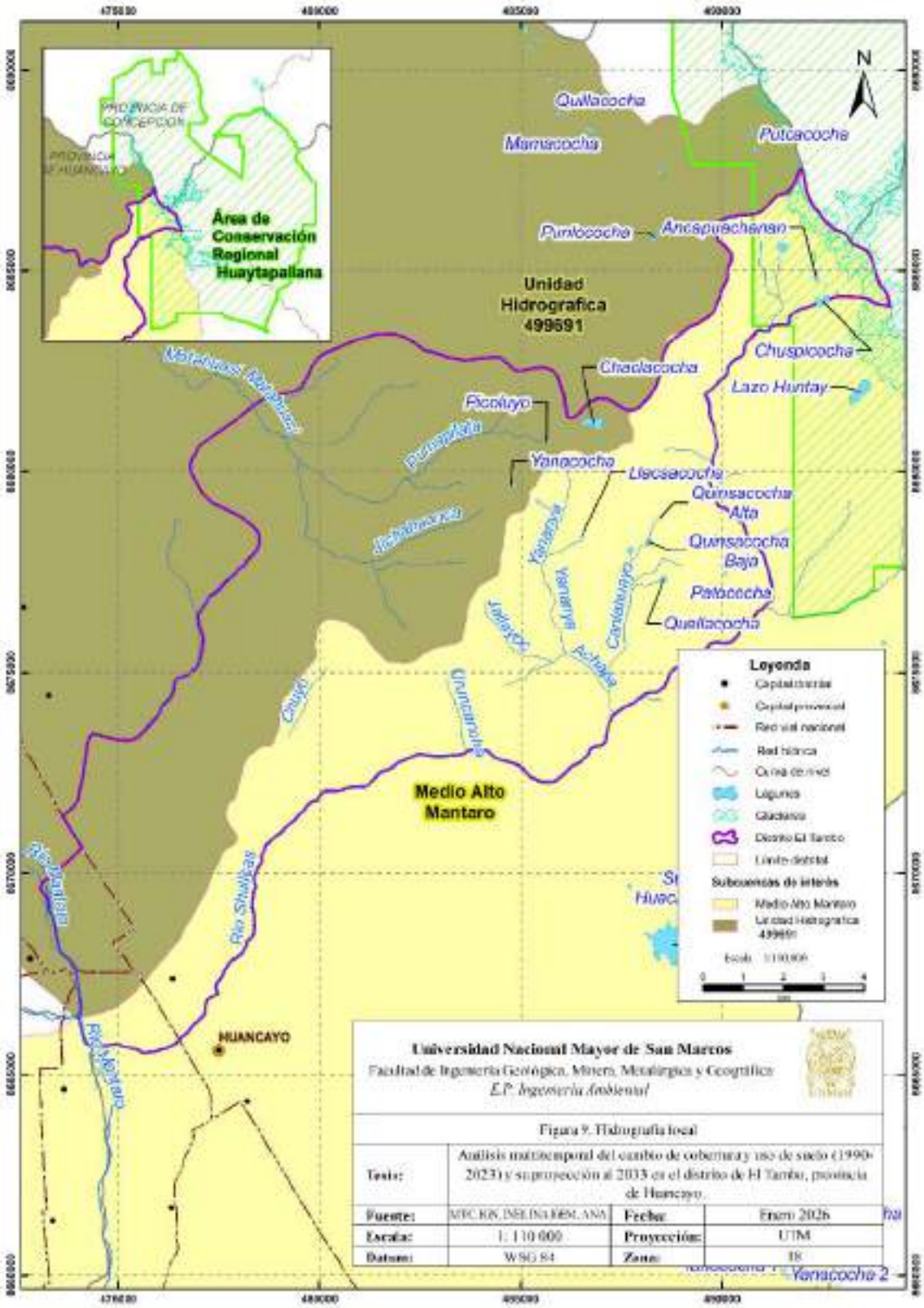


Figura 9. Hidrografía local
Fuente. Elaboración propia.

3.1.4 Clima y meteorología

3.1.4.1 Clasificación climática.

En el distrito de El Tambo hay 5 climas (ver Tabla 14). Los climas C (r) B' y C (o, i) C' se ubican en la parte baja del distrito donde se encuentra la mayor parte de la zona urbana. Mientras que el clima B (o, i) C abarca la mayor parte del distrito y los 2 climas se encuentran en la zona noreste circundante al nevado Huaytapallana (ver Figura 10).

Tabla 14. Clasificación climática

Código	Clima	Descripción
C (r) B'	Semiseco con humedad abundante todas las estaciones del año. Templado.	Ubicado en áreas con altitudes entre 1 500 m s. n. m. y 3 000 m s. n. m. del flanco oriental de la cordillera de los Andes. La temperatura máxima varía entre 21 °C y 25°C, mientras que las temperaturas mínimas se encuentran entre 7°C y 11°C. La precipitación anual varía entre 700 mm a 2 000 mm (Senamhi, 2021).
C (o, i) C'	Semiseco con otoño e invierno secos. Frío	Está en lugares con altitudes mayores a 4 500 m s. n. m. del flanco oriental de la cordillera de los Andes. La temperatura máxima varía entre 15 °C y 19°C, mientras que las temperaturas mínimas se encuentran entre -1°C y -3°C. La precipitación anual varía entre 700 mm a 900 mm (Senamhi, 2021).
B (o, i) C	Lluvioso con otoño e invierno secos. Frío.	Se ubica en lugares con altitudes mayores a 4 200 m s. n. m. del flanco occidental y oriental de la cordillera de los Andes. La temperatura máxima varía entre 9°C y 19°C, mientras que las temperaturas mínimas se encuentran entre -3°C y 3°C. La precipitación anual varía entre 500 mm a 1 200 mm (Senamhi, 2021).
A (r) D'	Muy lluvioso con humedad abundante todas las estaciones del año. Semifrígido	Se ubica en lugares con altitudes mayores a 5 000 m s. n. m. del flanco oriental de la cordillera de los Andes. La temperatura máxima varía entre 13°C y 15°C, mientras que las temperaturas mínimas se encuentran entre 1°C y 5°C. La precipitación anual varía entre 700 mm a 1 200 mm (Senamhi, 2021).
Hielo perenne	Glaciar	Se ubica en lugares con altitudes mayores a 5 000 m s. n. m. La temperatura máxima varía entre 7°C y 11°C, mientras que las temperaturas mínimas se encuentran entre -7°C y 1°C. La precipitación anual varía entre 900 mm a 1 500 mm (Senamhi, 2021).

Fuente. Adaptado de Senamhi (2021).

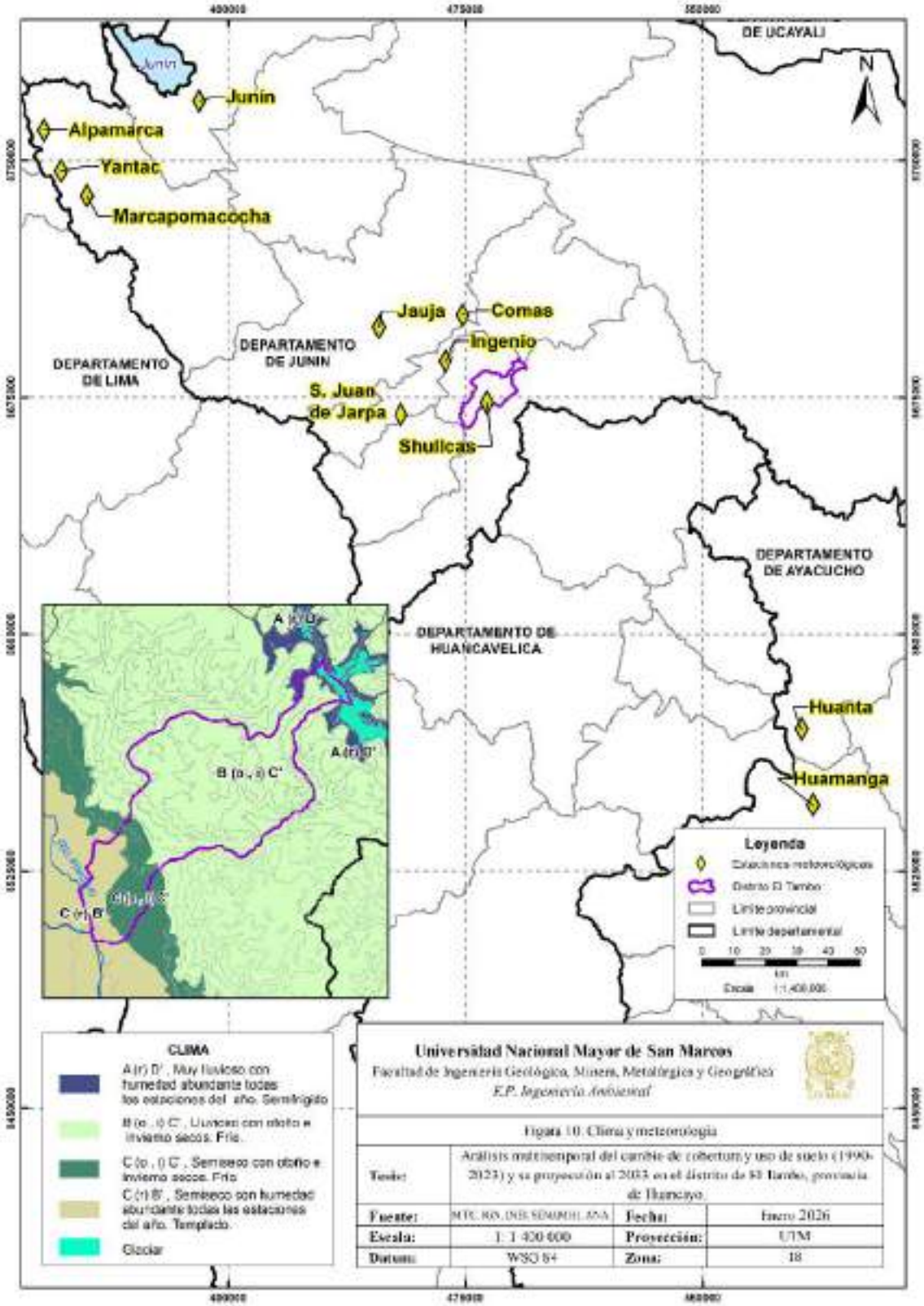


Figura 10. Clima y meteorología
Fuente. Elaboración propia.

3.1.4.2 Temperatura.

Según la Tabla 15 la temperatura media evaluada en 6 estaciones ubicados entre 3 422 m s. n. m. y 4 684 m s. n. m. (ver Figura 11) varía entre 4.5 °C y 11.7 °C (Tunque, 2023).

Tabla 15. Estaciones meteorológicas – temperatura (°C)

Estación	Coordenadas UTM (WGS 84 Zona 18 S)		Distrito/ Provincia/ Departamento	Altitud (m s.n.m)	T. Media (°C)
	Este (m)	Norte (m)			
Jauja	447766.19	8697390.84	Jauja/ Jauja/ Junín	3360	11.7
Ingenio	468658.96	8686607.32	Santa Rosa de Ocopa/ Concepción/ Junín	3422	11.5
S. Juan de Jarpa	454617.07	8669695.28	Chambara/ Concepción/ Junín	3650	9.7
Junín	390831.44	390831.44	Junín/ Junín/ Junín	4120	6.3
Marcapomacocha	355410.69	8738938.94	Marcapomacocha/ Yauli/ Junín	4479	4.6
Yantac	347188.74	8746765.6	Marcapomacocha/ Yauli/ Junín	4684	4.5

Fuente. Adaptado de Tunque (2023).

La temperatura media mensual presenta una variación estacional a lo largo del año, en los meses de diciembre a marzo presenta las más altas temperaturas que varían entre 6.76°C y 6.62°C; mientras que en los meses de mayo a setiembre se da la disminución de las temperaturas llegando en julio al valor más bajo del año con 4.46 °C (Tunque, 2023).

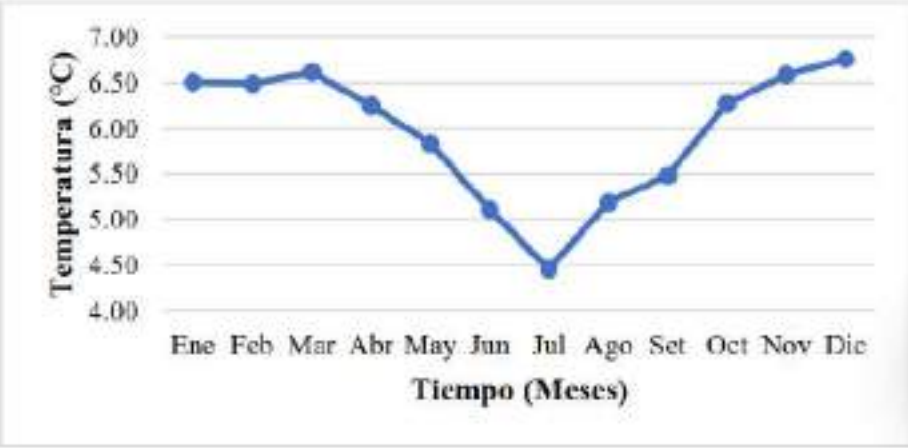


Figura 11. Temperatura media mensual
Fuente. Tomado de Tunque (2023).

3.1.4.3 Precipitación.

La precipitación anual según 5 estaciones (ver Figura 64) oscila entre 635.5 mm y 2 010.8 mm (ver Tabla 16) y varía a lo largo del año siguiendo una tendencia similar a la temperatura (ver Figura 12). La época seca abarca los meses de mayo a agosto, mientras que la época de lluvia alcanza sus valores más altos en los meses de enero, febrero y marzo con valores de hasta 231.9 mm (Tunque, 2023).

Tabla 16. Estaciones meteorológicas – precipitación (mm)

Estación	Coordenadas UTM (WGS 84 Zona 18 S)		Distrito/ Provincia/ Departamento	Altitud (m s.n.m)	Precipitación anual (mm)
	Este (m)	Norte (m)			
Comas	474097.07	8701233.27	Apata/Jauja/Junin	3640	901.9
Huanta	581354.78	8570117.49	Huanta/Ayacucho	2682	572.6
Huamanga	584866.61	8546113.58	Huamanga/Ayacucho	2761	635.5
Shullcas	481856.79	8673440.88	El Tambo/Huancayo/Junin	3750	941.5
Alpamarca	341667.2	8759670.53	Santa Bárbara de Carhuacayán/ Yauli/ Junin	4715	2 010.8

Fuente. Adaptado de Tunque (2023).

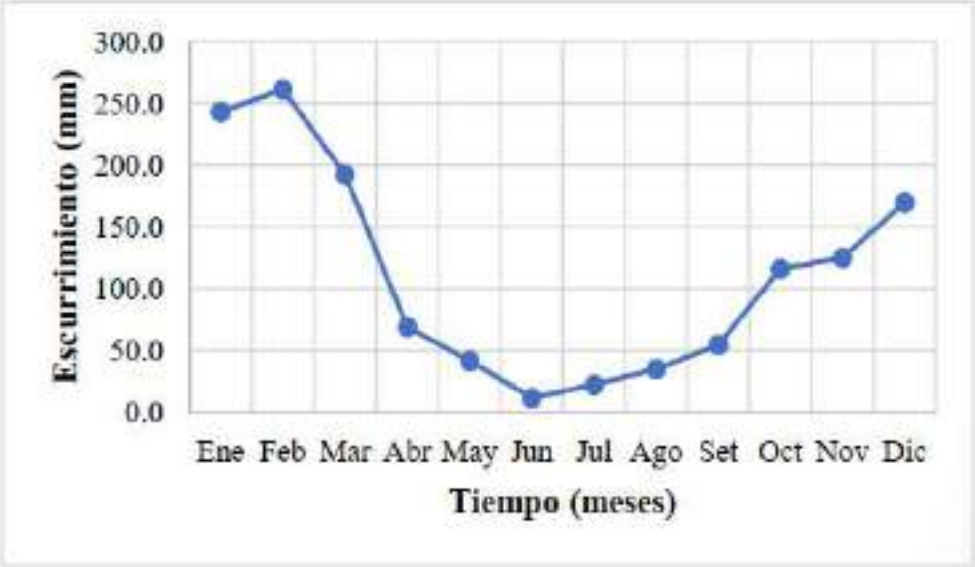


Figura 12. Precipitación total mensual (mm)
Fuente. Tomado de Tunque (2023).

3.1.5 Peligros geológicos y vulnerabilidad

En el distrito, se han intensificado los peligros geológicos como la probabilidad de ocurrencia de deslizamientos y otros procesos de geodinámica externa debido a la pérdida de cobertura glaciar del nevado Huaytapallana (Ministerio de Vivienda Construcción y Saneamiento, 2015).

En el periodo 2007 y 2016 la cantidad anual de damnificados osciló entre 228 y 540 personas debido a las bajas temperaturas, incendios en zonas urbanas, lluvias intensas, inundaciones, vientos fuertes, movimientos en masa (deslizamientos, derrumbes), entre otros. (Ministerio de Vivienda Construcción y Saneamiento, 2015).

En el visor de Cenepred, se observa la presencia de 5 niveles de susceptibilidad a eventos de movimiento en masas (movimiento lleno y/o rápido de rocas y/o suelo debido a la gravedad). Tal como se observa en la Figura 13 la zona baja del distrito se caracteriza por tener baja y muy baja susceptibilidad. Además, las zonas colindantes al río Shullcas concentran la mayor parte de los procesos de geodinámica externa como procesos de erosión, erosión fluvial, inundación fluvial, caída, deslizamiento y flujo; mientras que en las otras zonas del distrito se pueden observar procesos puntuales de reptación y movimientos complejos.

Respecto a la susceptibilidad a inundaciones, tal como se observa en la Figura 14 principalmente las zonas colindantes al Río Mantaro y al río Shullcas son altamente susceptibles durante los meses de lluvia.

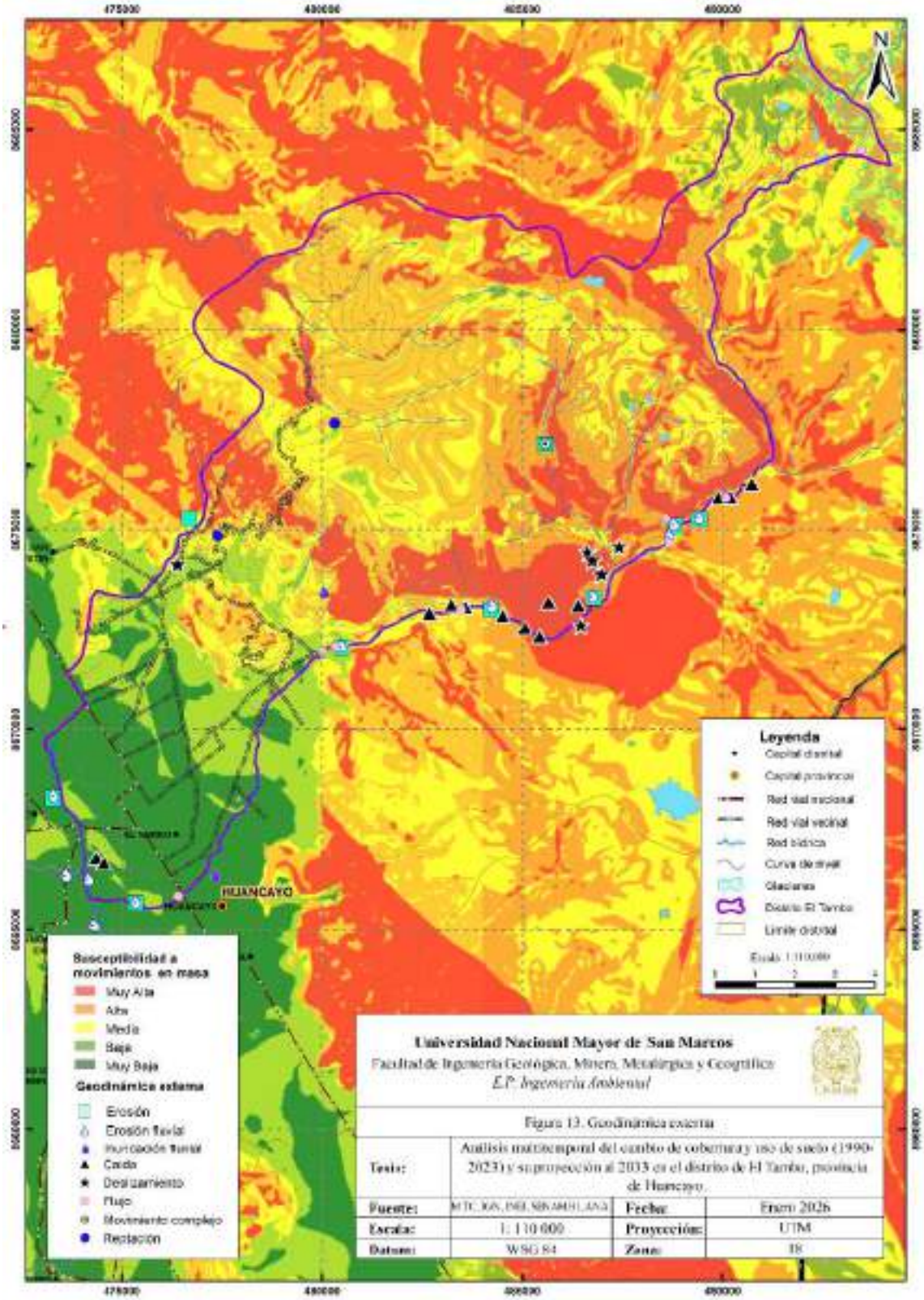


Figura 13. Geodinámica externa

*Fuente***.** Elaboración propia a partir de datos del Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres [Cenepred]. https://sigrid.cenepred.gob.pe/sigridv3/mapa

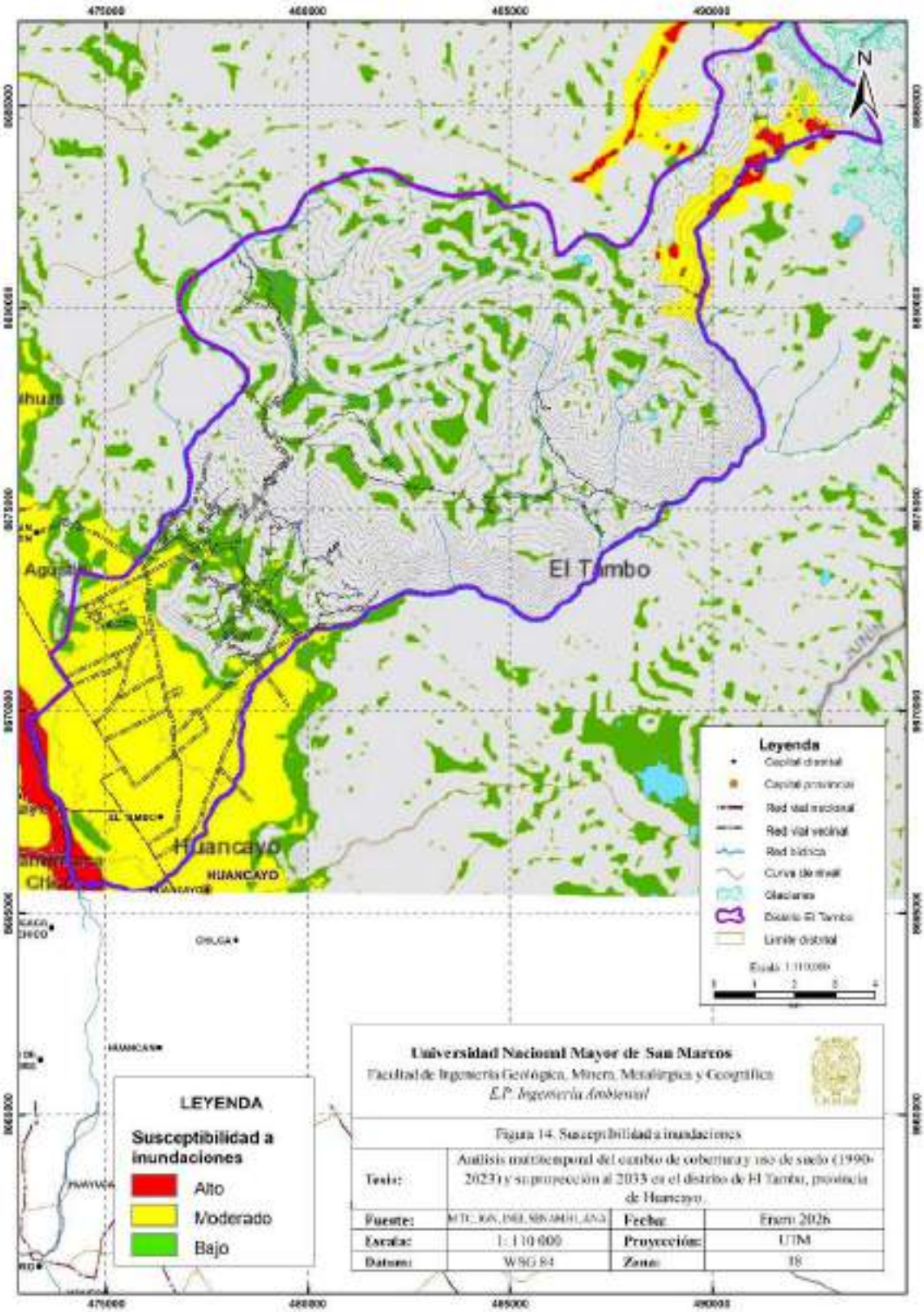


Figura 14. Susceptibilidad a inundaciones

Fuente. Elaboración propia a partir de datos del Cenepred. https://sigrid.cenepred.gob.pe/sigridv3/mapa

3.1.6 Aspectos sociales

3.1.6.1 Características demográficas.

El distrito es uno de los más poblados a nivel de la provincia de Huancayo y a nivel del departamento de Junín. La población total en el año 2017 fue de 169 033 habitantes (80 138 varones y 88 895 mujeres) y la densidad poblacional fue de 2 298 hab/ km^2. Además, el 95.56 % de la población (161 533) vivía en zona urbana y el 4.34 % (7 500) vivía en zona rural (INEI, 2017). Para el año 2020 y 2024 se proyectó una población de 175 725 y 179 769 personas respectivamente.

Respecto al censo de 1993 (112 284 habitantes), el crecimiento poblacional ha sido cerca del 50 % en 24 años (ver Tabla 17).

Tabla 17. Población en el distrito de El Tambo periodo 1993 – 2024

Información	Año censo	Zona		Total
		Urbana	Rural	
CENSO	1993	104 908	7 302	112 284
CENSO	2005	135 092	8 190	143 282
CENSO	2007	139 380	7 467	146 847
CENSO	2017	161 533	7 500	169 033
Dato proyectado*	2020	-	-	175 725
Dato proyectado	2024	-	-	179 769

Fuente. Censos nacionales 1993, 2005, 2007 y 2017 (INEI, s.f). https://www.gob.pe/36495-consultar-informacion-de-los-censos-realizados-por-el-inei-censos-nacionales-de-poblacion-y-vivienda . * Reyna, (2022)

3.1.6.1.1 Comunidades campesinas

En el distrito hay 3 comunidades, de las cuales las comunidades campesinas de Cochas Grande y Paccha están completamente dentro del distrito; mientras que la comunidad campesina de San Agustín tiene la mayor parte de su territorio en el distrito de San Agustín de Cajas (ver Figura 16).

En el distrito hay 15 centros poblados, de los cuales 2 son considerados urbanos y el resto son rurales. Tal como se observa en la Tabla 18, destacan los centros poblados de Cochas Chico, Cochas Grande, Cullpa Alta y Aza, ya que albergan a más de 1 000 personas; mientras que en Saños Chaupi y la Hacienda Suytucancha se registraron 46 y 5 personas respectivamente (INEI, 2018). Se precisa que el centro poblado El Tambo corresponde al casco urbano de la ciudad y alberga el 95 % de la población.

3.1.6.1.2 Centros poblados indígenas

En el distrito de El Tambo hay 10 centros poblados considerados como parte de los Pueblo Indígenas u Originarios Quechua que albergan una población de 7 634 habitantes representando el 4.5 % de la población total (ver Tabla 30). La mayoría de esta población vive en los centros poblados de Cochas Chico, Cullpa Alta y Aza.

Tabla 18. Centros poblados en el distrito de El Tambo

Número	Nombre de centro poblado*	Clasificación INEI	Localidad indígena u originario**	Población total***	
				Cantidad	Porcentaje (%)
1	El Tambo	Urbano	No	159 596	94.4
2	Cochas Chico	Urbano	Si	1 937	1.1
3	Cullpa Alta	Rural	Sí	1 547	0.9
4	Aza	Rural	Sí	1 419	0.8
5	Cullpa Baja	Rural	Sí	944	0.6
6	Hualahoyo	Rural	No	823	0.5
7	Paccha	Rural	Si	756	0.4
8	La Cantuta	Rural	No	523	0.3
9	Cochas Grande	Rural	Si	451	0.3
10	Urpaycancha	Rural	No	309	0.2
11	Incho	Rural	Sí	272	0.2
12	Ancalayo	Rural	Si	257	0.2
13	Chucruz	Rural	No	148	0.1
14	Saños Chaupi	Rural	Sí	46	0.0
15	Hacienda Suytucancha	Rural	Sí	5	0.0
Total				**169 033**	**100.0**

Nota: (*) Centros poblados según el INEI (2018) (**) Ministerio de Cultura (MINCUL, s.f.) visor BDPI Base de datos de Pueblos Indígenas u Originarios (***) Plataforma del sistema de información distrital para la gestión pública INEI. https://estadist.inei.gob.pe/map

Fuente. Adaptado de INEI (s.f.), INEI (2018) y MINCUL (s.f.)

3.1.6.1.3 Estancias y corrales

Se identificaron 33 lugares entre estancias y corrales (ver Figura 15 y Figura 16), una parte de ellos se ubica al noroeste del distrito cerca del límite con el distrito de Quilcas y la estancia más representativa es la Hacienda Suytucancha considerada como centro poblado según el INEI. Otro grupo se ubica al este del distrito, en la parte alta de la margen derecha del río Shullcas. La crianza de camélidos sudamericanos (llamas y alpacas) y ovinos sería la principal actividad económica realizada en estos lugares

Figura 15. Estancias y corrales
Fuente. Elaboración propia (2024).

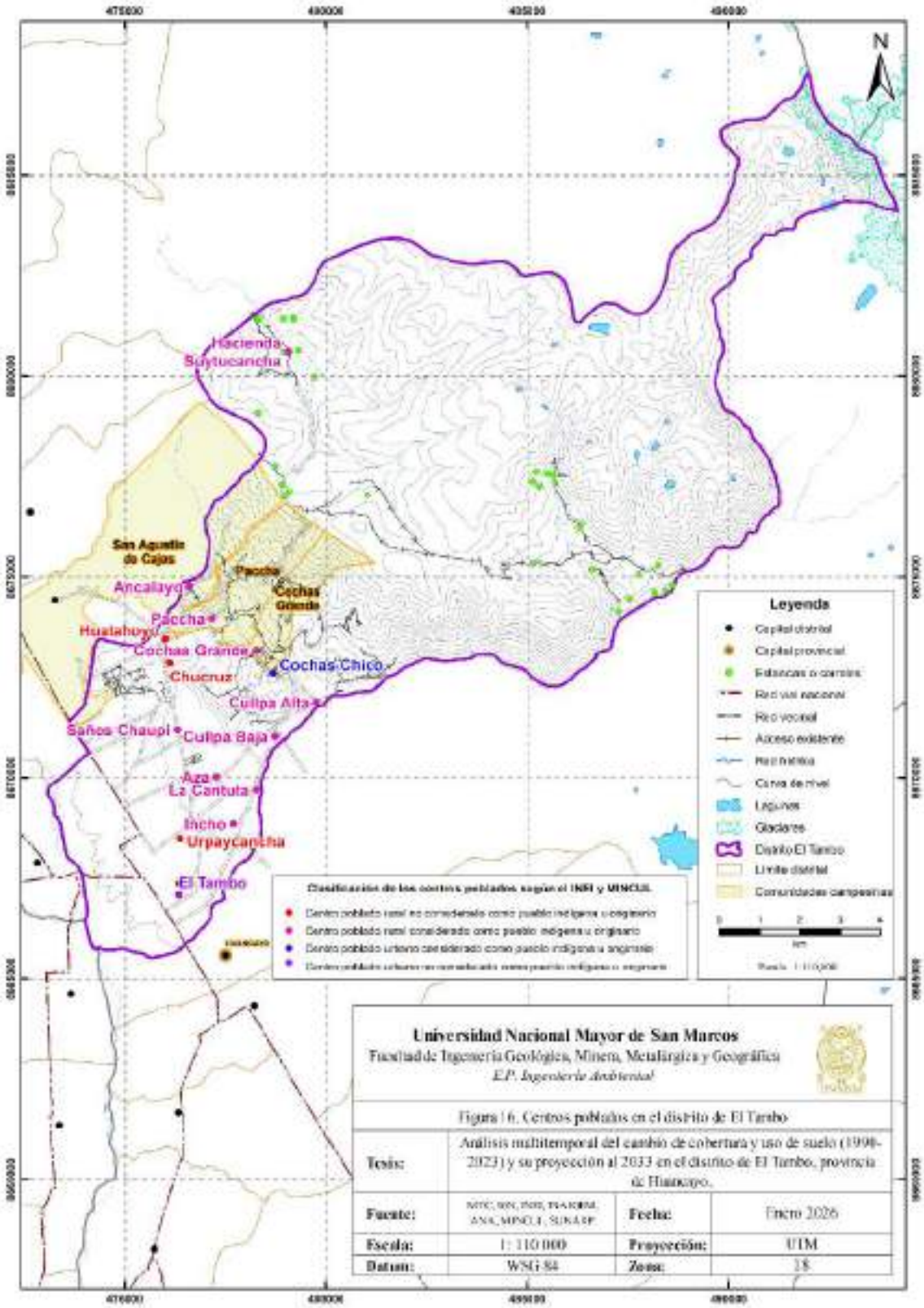


Figura 16. Centros poblados en el distrito de El Tambo
Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO 4: METODOLOGÍA

4.1 Tipo y diseño de la investigación

Según Hernández & Mendoza (2018), las investigaciones cuantitativas se clasifican en experimentales y no experimentales, esta última "[…] se realiza sin manipular deliberadamente variables. Es decir, se trata de estudios en los que no haces variar en forma intencional las variables independientes para ver su efecto sobre otras variables." (Hernández & Mendoza, 2018, p.174). Asimismo, en un estudio no experimental:

> […] no se genera ninguna situación, sino que se observan situaciones ya existentes, no provocadas intencionalmente en la investigación por quien la realiza. En la indagación no experimental las variables independientes ocurren y no es posible manipularlas, no se tiene control directo sobre dichas variables ni se puede influir en ellas, porque ya sucedieron, al igual que sus efectos. (Hernández & Mendoza, 2018, p.174)

Considerando ello, esta investigación es de tipo cuantitativa de diseño no experimental ya que no se manipuló la variable independiente, sino que se describió y midió los cambios que se dan en la realidad. Además, es del tipo longitudinal el cual "[…] estudia las características de las variables en un proceso de cambio, en este caso no se deben manipular las variables, solamente observar el proceso a lo largo de los periodos o el tiempo." (Arias & Covinos, 2021, p.79).

4.2 Hipótesis

4.2.1 Hipótesis general

La determinación del cambio de cobertura y uso de suelo para el periodo 1990-2023 sí permite su proyección al año 2033 en el distrito de El Tambo, provincia de Huancayo.

4.2.2 Hipótesis específica

- La identificación de las categorías de cobertura y uso de suelo para el periodo 1990-2023 aplicando la leyenda Corine Land Cover adaptada para Perú sí permite su proyección al año 2033 en el distrito de El Tambo, provincia de Huancayo.
- La determinación de la dinámica del cambio de cobertura y uso de suelo para el periodo 1990-2023 sí permite su proyección al año 2033 en el distrito de El Tambo, provincia de Huancayo.
- La determinación de la cobertura y uso de suelo al año 2033 sí permite su proyección al año 2033 en el distrito de El Tambo, provincia de Huancayo.

4.3 Variables

La primera variable es “Análisis multitemporal del cambio de cobertura y uso de suelo” y la segunda, es “Proyección de la cobertura y uso de suelo al 2033.” Según su naturaleza, ambas variables son cuantitativas continuas. Por otra parte, según su función; la primera es una variable independiente y la segunda es una variable dependiente.

4.3.1 Operacionalización de variables

La operacionalización de variables se presenta en la Tabla 19 y la matriz en consistencia en la Tabla 20.

Tabla 19. Operacionalización de variables

Variables	Definición conceptual	Definición operacional	Dimensiones	Indicadores	Instrumentos
Variable independiente: Análisis multitemporal del cambio de cobertura y uso de suelo.	"El análisis multitemporal permite tener un registro histórico de un determinado espacio, mostrando la dinámica en el área de interés. […] permite estimar y crear escenarios hacia el futuro" (Gallardo & Montes, 2021, pp. 39-40). El cambio en la cobertura del suelo se define como la transformación de la apariencia física de un paisaje determinado y el cambio en el uso de la tierra, como los cambios en el manejo de la tierra y sus atributos (Montero y Viales, 2016, p. 25)	La medición se realizó usando una matriz de cambios que resultó del análisis multitemporal de las imágenes satelitales Landsat que fueron clasificadas, validadas con el índice de Kappa y QADI y posteriormente corregidas. Se realizó el análisis para 3 intervalos: 1990-2003, 2003-2013 y 2013-2023.	Dimensión 1: Superficie de cada categoría de cobertura y uso de suelo aplicando la leyenda Corine Land Cover adaptada para Perú para los años 1990, 2003, 2013 y 2023. Dimensión 2: Intensidad de cambio (tasa de cambio) de los periodos 1990-2003, 2003-2013 y 2013-2023.	Indicador 1: Área en hectáreas (ha) de las categorías identificadas por año (1990, 2003, 2013 y 2023). Indicador 2: Área en hectáreas (ha) y variación porcentual (%) de las ganancias y/o pérdidas de cada categoría de cobertura y uso de suelo por periodo (1990-2003, 2003-2013 y 2013-2023).	1. Ficha de recojo de información "in situ" de cobertura y uso de suelo. 2. Imágenes satelitales Landsat de los años 1990, 2003, 2013 y 2023. 3. Uso de software: ArcGIS 10.8.1, ENVI 5.6, QGIS 3.28.15, RStudio.
Variable dependiente: Proyección de la cobertura y uso de suelo al 2033.	La proyección tiene como fin determinar áreas con mayor susceptibilidad a ser afectadas por procesos de conversión de ecosistemas naturales, esto consiste en la implementación de un modelo empírico que caracterice los procesos de conversión de la vegetación natural observados en el periodo aproximado (Rosero, 2017, p. 28). Representan un elemento o fase basado en la realidad, se consideran modelos dinámicos que pueden predecir posibles acciones futuras. Llaman la atención sobre el potencial para expresar el tamaño de los cambios, dónde estarán en el futuro y cómo se distribuirán espacialmente (Ríos, 2023, p.11).	Se proyectó la cobertura y uso de suelo al año 2033 usando el módulo Land Change Modeler del programa Terrset. En líneas generales, se usaron los mapas de la clasificación supervisada corregidas, así como variables o impulsores de cambio (pendiente, distancia a centros poblados, distancia a vías de acceso, etc.) para generar modelos del potencial transición. Luego, se empleó el análisis de Cadenas de Markov para proyectar la cantidad de cambio y la distribución al año 2033.	Dimensión 1: Superficie de cada categoría de cobertura y uso de suelo aplicando la leyenda Corine Land Cover adaptada para el año 2033. .	Indicador 1: Área (ha) de las categorías de cobertura y uso de suelo proyectadas al 2033. Indicador 2: Variación porcentual (%) de los cambios proyectados de cobertura y uso de suelo al 2033 respecto al año 2023.	1. Capas de entrada de los años 1990 y 2023. 2. Impulsores de cambio que cumplan con el análisis de V Cramer. 3. Módulo Land Change Modeler del programa Terrset y Map Comparison Kit 3.

Fuente. Elaboración propia**.**

Tabla 20. Matriz de consistencia

Título	Problema	Objetivo	Hipótesis	Variables	Metodología
Análisis multitemporal del cambio de cobertura y uso de suelo (1990-2023) y su proyección al 2033 en el distrito de El Tambo, provincia de Huancayo.	**Problema general** ¿Cuál es el cambio de la cobertura y uso de suelo para el periodo 1990-2023 y cuál es su proyección al 2033 en el distrito de El Tambo, provincia de Huancayo?	**Objetivo general** Determinar el cambio de cobertura y uso de suelo para el periodo 1990-2023 y su proyección al año 2033 en el distrito de El Tambo, provincia de Huancayo.	**Hipótesis General** La determinación del cambio de cobertura y uso de suelo para el periodo 1990-2023 sí permite su proyección al año 2033 en el distrito de El Tambo, provincia de Huancayo.	**Variable independiente:** Análisis multitemporal del cambio de cobertura y uso de suelo. **Variable dependiente:** Proyección de la cobertura y uso de suelo al 2033	**Tipo de investigación:** Cuantitativa **Diseño de investigación:** No experimental de tipo longitudinal. **Población:** Territorio del distrito de El Tambo. **Unidad de análisis**: Categorías de cobertura y uso de suelo del distrito de El Tambo.
	Problemas específicos	**Objetivos específicos**	**Hipótesis específicas**		**Técnicas e instrumentos:**
	¿Cuáles son las categorías de cobertura y uso de suelo para el periodo 1990-2023 aplicando la leyenda Corine Land Cover adaptada para Perú en el distrito de El Tambo, provincia de Huancayo?	Identificar las categorías de cobertura y uso de suelo para el periodo 1990-2023 aplicando la leyenda Corine Land Cover adaptada para Perú en el distrito de El Tambo, provincia de Huancayo.	La identificación de las categorías de cobertura y uso de suelo para el periodo 1990-2023 aplicando la leyenda Corine Land Cover adaptada para Perú sí permite su proyección al año 2033 en el distrito de El Tambo, provincia de Huancayo.		Observación indirecta (uso de información cartográfica, uso de imágenes satelitales, revisión bibliográfica) y observación directa ("in situ"). Clasificación supervisada "Maximum Likelihood Classification (MLC)" o Clasificación de Máxima Verosimilitud de imágenes satelitales Landsat de los años 1990, 2003, 2013 y 2023, aplicando la leyenda Corine Land Cover adaptada para Perú. Validación de la clasificación supervisada usando los índices de Kappa y QADI.
	¿Cómo es la dinámica del cambio de cobertura y uso de suelo para el periodo 1990-2023 en el distrito de El Tambo, provincia de Huancayo?	Determinar la dinámica del cambio de cobertura y uso de suelo para el periodo 1990-2023 en el distrito de El Tambo, provincia de Huancayo.	La determinación de la dinámica del cambio de cobertura y uso de suelo para el periodo 1990-2023 sí permite su proyección al año 2033 en el distrito de El Tambo, provincia de Huancayo.		**Técnicas e instrumentos:** Análisis multitemporal y análisis de intensidad de cambios (nivel de intervalo, nivel de categoría, nivel de transición) para los periodos 1990-2003, 2003-2013 y 2013-2023.
	¿Cuál es la proyección de la cobertura y uso de suelo en el año 2033 en el distrito de El Tambo, provincia de Huancayo?	Determinar la proyección de la cobertura y uso de suelo al año 2033 en el distrito de El Tambo, provincia de Huancayo.	La determinación de la cobertura y uso de suelo al año 2033 sí permite su proyección al año 2033 en el distrito de El Tambo, provincia de Huancayo.		**Técnicas e instrumentos:** Proyección usando el módulo Land Change Modeler del software Terrset y generación de escenarios proyectados al 2033 en base a la cobertura y uso de suelo de los años 1990 y 2023. Validación retrospectiva del modelo de proyección mediante el índice de Kappa en el programa Map Comparison Kit 3.

Fuente. Elaboración propia

4.4 Población, unidad de análisis y muestreo

4.4.1 Población

Según Hernández & Mendoza (2018) la población es el "Conjunto de todos los casos que concuerdan con determinadas especificaciones." (p.199). Adicionalmente indican que "Las poblaciones deben situarse de manera concreta por sus características de contenido, lugar y tiempo, así como accesibilidad." (Hernández & Mendoza, 2018, p.199). Por consiguiente, la población para esta investigación es todo el territorio del distrito de El Tambo.

4.4.2 Unidad de análisis

"La unidad de análisis es aquel objeto de estudio de quien se producen los datos o la información para el análisis del estudio." (Arias & Covinos, 2021, p.118). Además, Hernández & Mendoza (2018) explican que "Aquí el interés se centra sobre "qué" o "quiénes" se recolectarán los datos (personas u otros seres vivos, objetos, sucesos, colectividades de estudio) […]" (p.197).

Considerando ello, la unidad de análisis son las categorías de cobertura y uso de suelo, ya que la presente investigación generó información relacionada al análisis del cambio de cobertura y uso de suelo.

4.4.3 Tamaño de muestra y método de muestreo

Según las características de esta investigación, fue necesario contar con 2 grupos de muestras (puntos o polígonos), el primero se usó para la clasificación supervisada de imágenes satelitales y el segundo para validación de la clasificación supervisada (evaluación de la exactitud temática).

4.4.3.1 Muestras para la clasificación supervisada.

La cantidad de muestras (áreas de entrenamiento) estuvo condicionada por la superficie aproximada de cada cobertura y uso de suelo. Tal como se presenta en la Tabla 21, las categorías como el herbazal abierto, áreas agrícolas heterogéneas y áreas urbanizadas tuvieron mayor cantidad de áreas de entrenamiento ya que visualmente se observó mayor superficie, a diferencia de los glaciares y cuerpos de agua que son áreas

más pequeñas. Adicionalmente, con la finalidad de aumentar la representatividad de las áreas se realizó el análisis de firmas espectrales y el análisis de separabilidad de Jeffries-Matusita y de Divergencia Transformada que se describe a detalle en el *Ítem 2.9.3.2 Generación de áreas o muestras de entrenamiento*. El muestreo fue no probabilístico ya que dependió de los criterios antes mencionados para su distribución en el área de estudio.

Tabla 21. Cantidad de muestras para la clasificación supervisada

Número	Código	Descripción	Año 2023	Año 2013	Año 2003	Año 1990
1	AUR	Áreas urbanizadas	16	16	16	14
2	CULT	Áreas agrícolas heterogéneas	23	23	23	26
3	BOS	Bosque	15	15	11	11
4	HERA	Herbazal abierto	24	26	26	24
5	HERD	Herbazal denso	14	14	14	14
6	AR-TD	Afloramientos rocosos y tierras desnudas	9	9	11	9
7	GLA	Glaciares	9	9	9	9
8	BOF	Turberas y bofedales	11	11	11	11
9	AGU	Cuerpos de agua	6	6	6	6
Total áreas de entrenamiento			**127**	**129**	**127**	**124**

Fuente. Elaboración propia.

4.4.3.2 Muestras para la validación de la clasificación supervisada.

A diferencia de las muestras de clasificación, para este grupo sí se requiere un proceso metodológico para determinar la cantidad y la distribución espacial. En ese sentido, el tamaño de muestra es "Subgrupo del universo o población del cual se recolectarán los datos y que debe ser representativo de ésta" (Hernández *et al.,* 2014, p.173). Considerando ello, para la cantidad de muestras se usó la ecuación 1 (Barba, 2018):

$$n = \frac{Z^2 p(qN)}{(N-1)E^2 + Z^2 pq} \text{.....(Ec.1)}$$

Dónde:

Z: Es el valor de la curva normal estandarizada para un nivel determinado de probabilidad, 1.96 (95 %).

p: Indica el porcentaje de aciertos estimado, 0.50 (50 %).

q: Indica el porcentaje de errores (q = 1 – p), 0.50 (50 %).

N: Tamaño de la población.

E: El error permitido, 0.05 (5 %).

4.4.3.3 Método de muestreo.

En general, existen 2 estrategias de muestreo: probabilístico y no probabilístico. De acuerdo con Arias & Covinos (2021), el proceso de la selección de la muestra probabilística:

> Involucra la selección de unidades de tal manera que dichas unidades tengan la misma probabilidad de ser seleccionadas, además estas deben ser estadísticamente representativas, para ello se aplica una fórmula estadística […] (p. 114).

En esta investigación se realizó el muestreo no probabilístico de las muestras usadas en la clasificación supervisada. Mientras que, las muestras de validación se distribuyeron mediante el muestreo probabilístico del tipo aleatorio estratificado usando la herramienta "Create Random Points" del programa ArcGIS 10.8.1.

El muestreo aleatorio estratificado consiste en dividir a la población en grupos o estratos según la similitud de sus características y posterior a ello se toma una muestra aleatoria (Gómez & Gómez, 2019). Una de sus ventajas es que "[…] se obtiene mayor precisión ya que a un mismo tamaño de muestra, el error de muestreo es menor y se favorece la administración del muestreo" (Gómez & Gómez, 2019, p. 45).

4.5 Técnicas e instrumentos

4.5.1 Objetivo específico 1

- Observación indirecta (uso de información cartográfica, uso de imágenes satelitales, revisión bibliográfica)
- Observación directa ("in situ") completando fichas de identificación (ver Anexo 3)
- Clasificación supervisada "Maximum Likelihood Classification (MLC)" o Clasificación de Máxima Verosimilitud de imágenes satelitales Landsat de

los años 1990, 2003, 2013 y 2023, aplicando la leyenda Corine Land Cover adaptada para Perú (ver Anexo 1).

- Validación de la clasificación supervisada usando los índices de Kappa y QADI.

4.5.2 Objetivo específico 2

- Análisis multitemporal para los periodos 1990-2003, 2003-2013 y 2013-2023.
- Análisis de intensidad de cambios (nivel de intervalo, nivel de categoría, nivel de transición) propuesto por Aldwaik & Pontius Jr (2012) para los periodos 1990-2003, 2003-2013 y 2013-2023.

4.5.3 Objetivo específico 3

- Proyección usando el módulo Land Change Modeler del software Terrset y generación de escenarios proyectados al 2033 en base a la cobertura y uso de suelo de los años 1990 y 2023.
- Validación retrospectiva del modelo de proyección mediante el resultado del índice de Kappa en el programa "Map Comparison Kit 3".

4.5.4 Materiales y equipos

4.5.4.1 Materiales cartográficos.

Imágenes Landsat, imágenes de Google Earth, bases de datos oficiales para la cartografía base (Ministerios de Transporte, Ministerio del Ambiente [MINAM], Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña [INAIGEM], Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú – Senamhi, entre otros).

4.5.4.2 Materiales y equipos de campo.

Libreta, lapiceros, Sistema de Posicionamiento Global GPS y celular para el uso de la cámara.

4.5.4.3 Materiales y equipos de gabinete.

Laptop, Microsoft Office 365, ArcGIS 10.8.1, ENVI 5.6, QGIS 3.28.15, RStudio, Terrset 20.02, código creado por Aldwaik y Pontius Jr. (2012) para el análisis de intensidad de cambio, Google Earth y Map Comparison Kit 3.

4.5.5 Análisis e interpretación

Para la investigación se usaron diferentes métodos de análisis que se mencionan a continuación:

- Clasificación supervisada: Se realizó de forma preliminar la clasificación supervisada utilizando diferentes algoritmos de clasificación disponibles en el programa ENVI 5.6. Se eligió la clasificación supervisada Maximum Likelihood Classification (MLC) o Clasificación de Máxima Verosimilitud ya que presentó mayor porcentaje de exactitud temática.
- Interpretación visual interdependiente: Técnica de interpretación que considera los polígonos de una fecha inicial para interpretar las categorías de otros años, actualizando únicamente zonas donde se observan cambios. Este procedimiento es confiable y efectivo porque ayuda a reducir el mínimo de errores de posición y de clasificación (López *et al.,* 2018). Esto se utilizó principalmente en la etapa de edición vectorial para las categorías de turberas y bofedales; y cuerpos de agua.
- Análisis multitemporal: Es la identificación de las categorías de cobertura y uso de suelo obtenidos en los años de estudio, para analizar y cuantificar los cambios en el periodo 1990-2003, 2003-2013 y 2013-2023.
- Análisis de intensidad de cambios: Intensidad de cambio a nivel de intervalo, nivel de categoría y nivel de transición en base a las matrices de cambio del periodo evaluado. Se utilizó el código creado por Aldwaik y Pontius Jr. (2012) para obtener los gráficos del análisis de intensidad de cambio.

4.6 Procedimiento

Para fines prácticos en la Figura 17 se presenta el diagrama de flujo de la presente investigación.

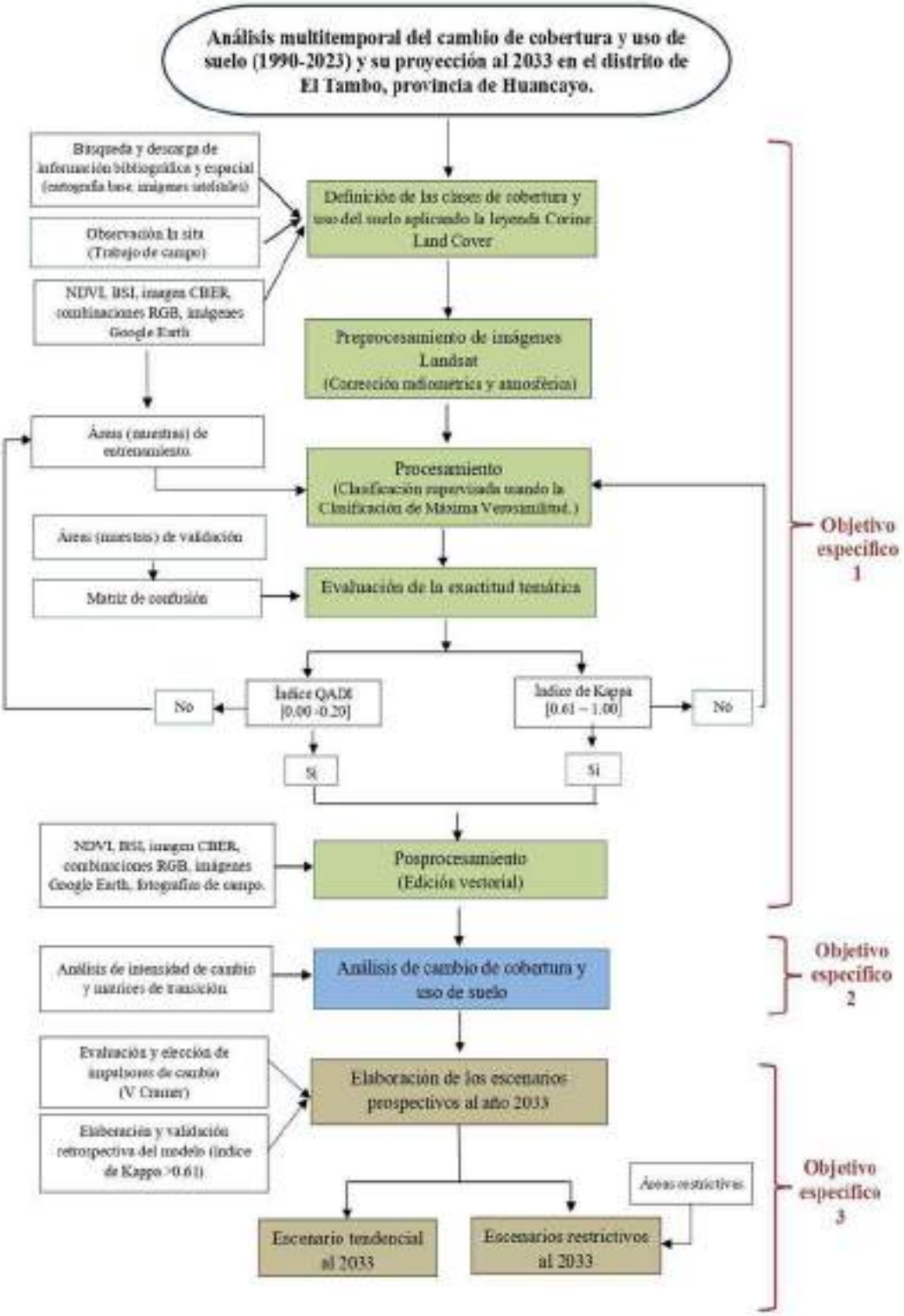


Figura 17. Diagrama de flujo de la investigación
Fuente. Elaboración propia.

4.6.1 Definición de las categorías de cobertura y uso de suelo

4.6.1.1 Búsqueda de información bibliográfica y cartográfica.

Se revisó información secundaria oficial de instituciones gubernamentales e investigaciones realizadas a nivel local para definir de forma preliminar las categorías de cobertura y uso de suelo. A continuación, se detallan las fuentes revisadas:

- Mapa Nacional de Cobertura Vegetal (MINAM, 2015)
- Memoria descriptiva del Estudio de Uso Actual de las Tierras del departamento de Junín a escala 1:100 000 (Gobierno Regional de Junín, 2015a) y Memoria Descriptiva del Estudio de Cobertura Vegetal del Departamento de Junín a Escala 1:100000 (Gobierno Regional de Junín, 2015b) realizado como parte de la Zonificación Ecológica y Económica de la Región Junín (Gobierno Regional de Junín, 2015c).
- Plan de ordenamiento ambiental de la subcuenca Shullcas - provincia de Huancayo - departamento de Junín (Yaringaño, 2019).
- La expansión urbana de la ciudad de Huancayo y su repercusión en el uso sostenible del suelo del Valle del Mantaro (1944-2022) (Granados, 2023).

4.6.1.2 Búsqueda y descarga de imágenes satelitales.

Se descargaron imágenes satelitales Landsat de los años 1990, 2003, 2013 y 2023 con porcentaje de nubosidad menor al 20 %, a excepción de la imagen del año 1990 que tuvo el 40 %, pero en el área del distrito no presentó nubosidad. Se observó que las imágenes correspondientes al periodo de lluvia (noviembre a abril) presentaban alto porcentaje de nubosidad en el distrito de El Tambo, por ello se optó por elegir imágenes de época seca (mayo-agosto) y de preferencia del mismo mes con la finalidad de identificar la cobertura y uso de suelo en condiciones climáticas similares.

Considerando los criterios antes descritos, se eligieron imágenes del mes de julio para los años 2003, 2013 y 2023; y solo para el año 1990 se eligió el mes de agosto. En la Tabla 22 se detallan más características.

Tabla 22. Imágenes satelitales Landsat utilizadas para realizar la clasificación supervisada

Número	Nombre	Landsat	Fecha de la imagen	Path/Row	Nubosidad
1	LC08_L1TP_006068_20230723_20230803_02_T1_B1	Landsat 8	23/07/2023	006/068	20 %
2	LC08_L1TP_006068_20130711_20200912_02_T1_B1	Landsat 8	11/07/2013	006/068	20%
3	LT05_L1TP_006068_20030716_20200904_02_T1	Landsat 5	16/07/2003	006/068	20 %
4	LT05_L1TP_006068_19900813_20200915_02_T1	Landsat 5	13/08/1990	006/068	20 %

Fuente. Elaboración propia con información del portal https://earthexplorer.usgs.gov/

Adicionalmente, solo para el año 1990 se descargó la imagen Landsat 5 del mes de febrero; y para el año 2023 se descargó la imagen CBER del 07 de julio que tiene 4 bandas y una resolución de 8 m. Esta última se usó principalmente para identificar turberas y bofedales y los cuerpos de agua (lagunas) mediante la combinación de bandas (ver Anexo 2).

Tabla 23. Imágenes satelitales complementarias

Número	Nombre	Satélite	Fecha de la imagen	Path/Row	Nubosidad
1*	LT05_L1TP_006068_19900218_20200916_02_T1	Landsat 5	18/02/1990	006/068	40 %
2	CBERS_4A_WPM_20230710_242_128_L4	CBER	10/07/2023	-	-

Fuente. Elaboración propia con información del portal https://earthexplorer.usgs.gov/ y https://www.dgi.inpe.br/catalogo/explore

Nota: (*) Solo se usó para realizar los índices espectrales y compararlo con la imagen Landsat de agosto del año 1990. El área correspondiente al distrito no presentó nubosidad.

Los efectos fenológicos pueden influir en la respuesta espectral de las coberturas asociadas a la vegetación como las áreas agrícolas que tienen mayor apariencia de vigorosidad en ciertas etapas del crecimiento vegetal por lo que pueden ser confundidas con otras categorías. Se precisa que, en el área de estudio, se identificó que los cultivos son cosechados hasta el mes de junio. En ese sentido, los criterios antes definidos (imágenes de la misma temporalidad y de época seca), combinación de bandas RGB e imágenes de alta resolución de Google Earth en la etapa de corrección vectorial, permitieron reducir en cierto grado los errores de clasificación de las áreas agrícolas.

4.6.1.3 Observación in situ.

Se realizó la visita al área de estudio los días 25 y 26 de mayo; 2 y 8 de junio; 17 de noviembre y 25 de diciembre del 2024 donde se tomaron fotografías y coordenadas con GPS de puntos de cobertura y uso de suelo. Las fichas de puntos representativos de cobertura y uso de suelo se adjuntan en el Anexo 2; mientras que en el Anexo 3 se adjunta información de otros puntos tomados con el GPS que sirvieron para la validación de la clasificación supervisada o para la etapa de edición vectorial (corrección de la clasificación). Es importante precisar que no fue posible acceder a las áreas con herbazal denso (HERD) y glaciar (GLA), pero se revisaron las fotografías disponibles en Google Maps para validar su existencia. Adicional a ello, también se revisaron las imágenes de alta definición disponibles en Google Earth.

En base a la integración de información secundaria y lo observado en campo, tal como se observa en la Tabla 24 se definieron 9 categorías de cobertura y uso de suelo de acuerdo con la leyenda Corine Land Cover: áreas urbanizadas (AUR); áreas agrícolas heterogéneas (CULT); herbazal abierto (HERA); herbazal denso (HERD); afloramientos rocosos y tierras desnudas (AR-TD); glaciares (GLA); turberas y bofedales; y cuerpos de agua (AGU). Esta última se añadió ya que según Acco (2021) en los niveles III y IV de Corine Land Cover es posible añadir categorías según las características del área de estudio. Es importante que, para fines prácticos a cada categoría se le designaron términos abreviados.

Tabla 24. Cobertura y uso de suelo en el distrito de El Tambo según la leyenda Corine Land Cover

Categorías Corine Land Cover identificadas en el distrito			
Nivel I	**Nivel II**	**Nivel III**	**Nivel IV**
Áreas artificializadas	Áreas urbanizadas (AUR)		
Áreas agrícolas	Áreas agrícolas heterogéneas (CULT)		
Bosques y áreas mayormente naturales	Bosque (BOS)		
	Áreas con vegetación herbácea y/o arbustivo	Herbazal	Herbazal denso (HERD) Herbazal abierto (HERA)
	Áreas sin o con poca vegetación	Afloramientos rocosos y tierras desnudas (AR-TD)	

Categorías Corine Land Cover identificadas en el distrito			
Nivel I	**Nivel II**	**Nivel III**	**Nivel IV**
		Glaciares (GLA)	
Áreas	Áreas húmedas continentales	Turberas y bofedales (BOF)	
		Cuerpos de agua (AGU)	

Fuente. Elaboración propia.
Nota: La leyenda Corine Land Cover no considera códigos para referirse a cada categoría, por ello para fines prácticos en esta investigación se definieron términos cortos que ayuden a identificar cada categoría.

4.6.2 Preprocesamiento de imágenes satelitales

El preprocesamiento de las imágenes satelitales Landsat de los años 1990, 2003, 2013 y 2023 consistió en la corrección radiométrica y atmosférica en el programa ENVI 5.6.

4.6.2.1 Corrección radiométrica.

Se utilizó la herramienta "Radiometric Calibration" donde se cargaron las imágenes satelitales y se configuraron los parámetros que se muestran en la Figura 18.

Figura 18. Parámetros para la corrección radiométrica
Fuente. Elaboración propia.

4.6.2.2 Corrección atmosférica.

Se usó la herramienta "FLAASH Atmospheric Correction Model Input Parameters" para corregir las imágenes que resultaron de la corrección radiométrica. Se precisa que la configuración para las imágenes Landsat 8 y Landsat 5 difiere en la pestaña

“Aerosol Retrieval” ya que solo Landsat 8 cuenta con la Banda 1 Ultra Azul (costero/aerosol). Por eso, para la corrección de Landsat 8 se colocó en la pestaña “Aerosol Retrieval” la opción de “2-Band (K-T)” (ver Figura 19), mientras que para Landsat 5, se colocó la opción “None” (ver Figura 20).

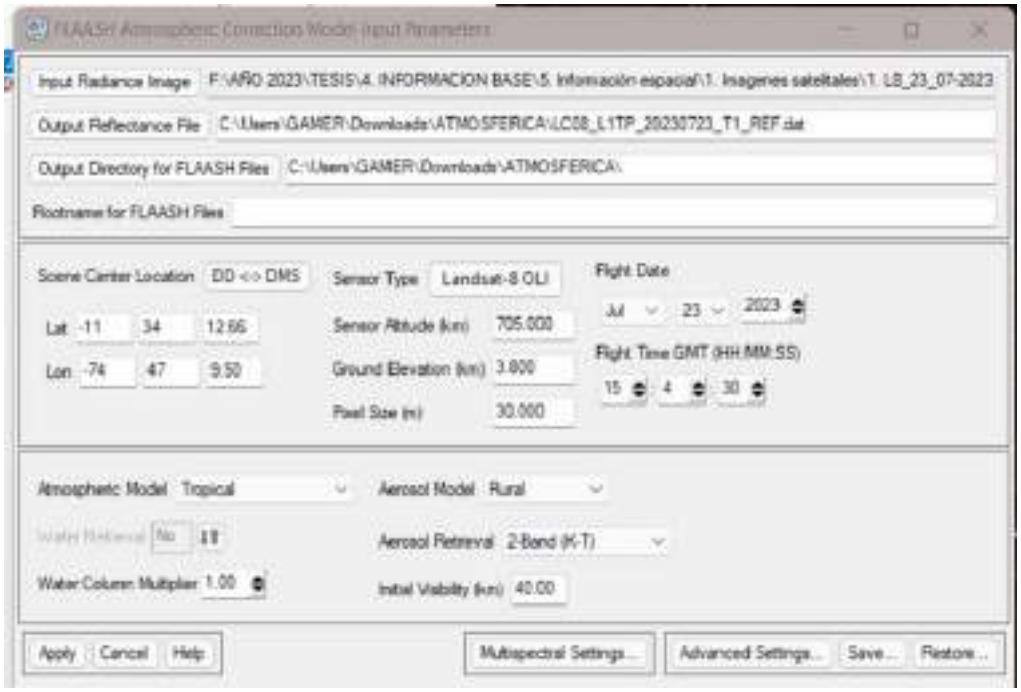


Figura 19. Parámetros para la corrección atmosférica de imágenes Landsat 8 (años 2023 y 2013)
Fuente. Elaboración propia.

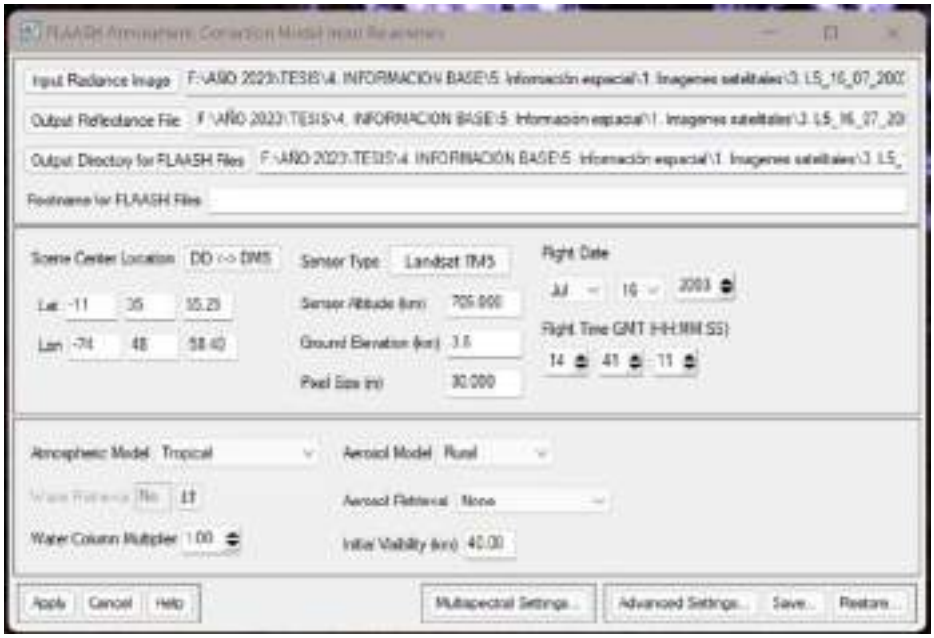


Figura 20. Parámetros para la corrección atmosférica de imágenes Landsat 5 (años 1990 y 2003)
Fuente. Elaboración propia.

4.6.3 Procesamiento de las imágenes satelitales

4.6.3.1 Generación y revisión de información complementaria.

4.6.3.1.1 Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI):

Se usó la herramienta "Vegetation Delineation and Stress Detection" (ver Figura 21) considerando lo descrito por Subia (2020) donde los suelos desnudos oscilan entre - 0.1 a 0.2 y la presencia de vegetación se da a partir de 0.2. Según los resultados obtenidos (ver Figura 22 y Figura 23) en la parte baja (suroeste del distrito) y en la parte alta (noreste del distrito) los valores menores a 0.2 (color marrón) son áreas sin vegetación que coinciden parcialmente con áreas urbanizadas, glaciares, cuerpos de agua; y afloramientos rocosos y tierras desnudas. Mientras que los valores mayores a 0.66 (verde oscuro) coincidieron con bosque y algunos bofedales. Respecto a los valores comprendidos en el rango de <0.2 – 0.66> no se asocia a alguna categoría de cobertura y uso de suelo en específico.

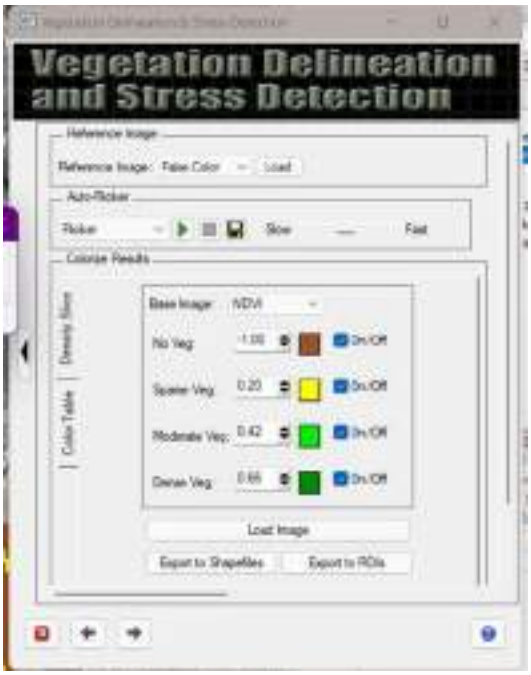


Figura 21. Configuración de la herramienta "Vegetation Delineation and Stress Detection" para el cálculo de NDVI
Fuente. Elaboración propia.

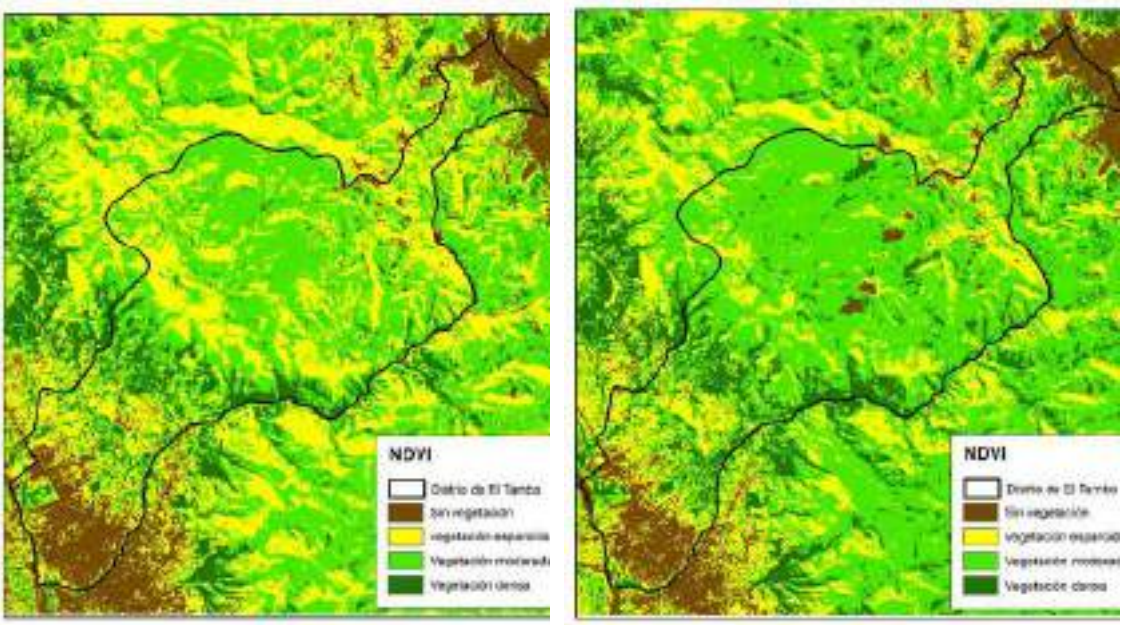


Figura 22. NDVI del año 2023 y 2013
Fuente. Elaboración propia.
Nota. Imagen izquierda NDVI del año 2023. Imagen derecha NDVI del año 2013.

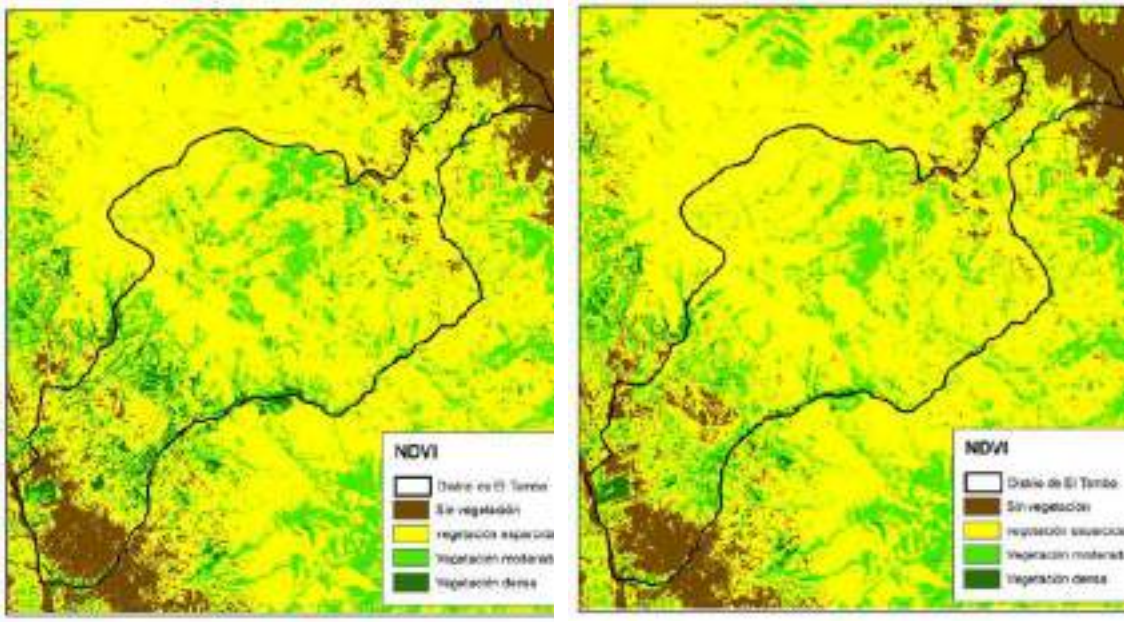


Figura 23. NDVI del año 2003 y 1990
Fuente. Elaboración propia.
Nota. Imagen izquierda NDVI del año 2003. Imagen derecha NDVI del año 1990.

4.6.3.1.2 Índice de suelo desnudo (BSI)

Tal como se observa en la Figura 24, Figura 25, Figura 26 los valores más cercanos a -1 (color verde) se asociaron a la presencia de bosque y glaciar. Sin embargo, en el caso de la imagen Landsat 5 del 18 de febrero de 1990 los valores negativos en la parte baja del distrito se asociaron a las áreas agrícolas heterogéneas que, por su desarrollo fenológico tiene mayor vigor vegetativo en los meses de lluvia. Los valores más cercanos a 1 (áreas con escasa o nula vegetación) que se representan con tonos rojizos, asocian a áreas urbanizadas y herbazal abierto.

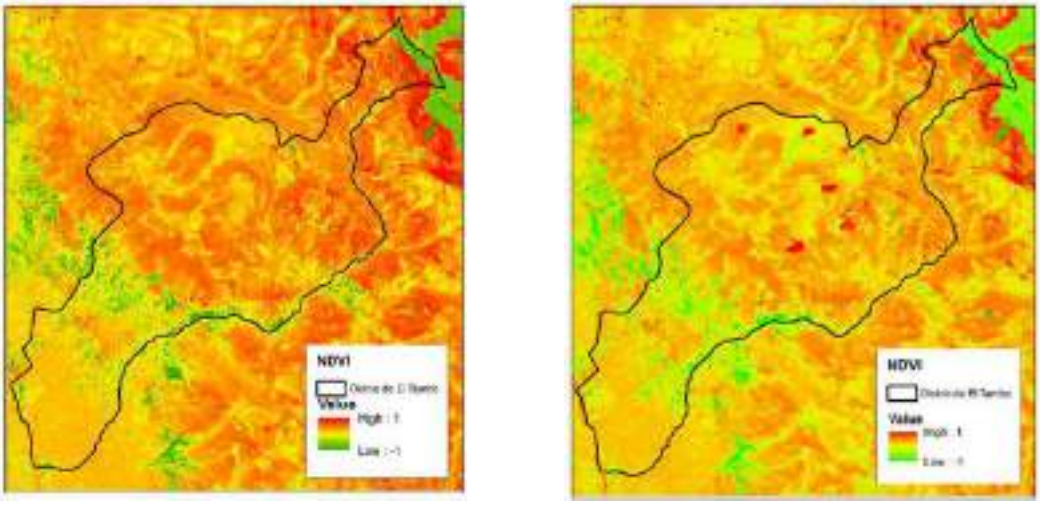


Figura 24. BSI del año 2023 y 2013
Fuente. Elaboración propia.
Nota: Imagen izquierda BSI del año 2023. Imagen derecha BSI del año 2013.

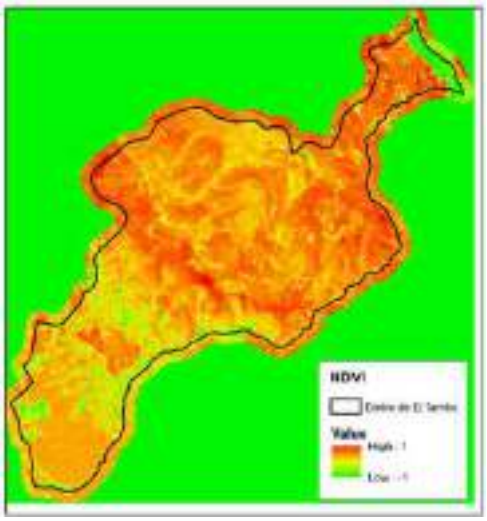


Figura 25. BSI del año 2003
Fuente. Elaboración propia.

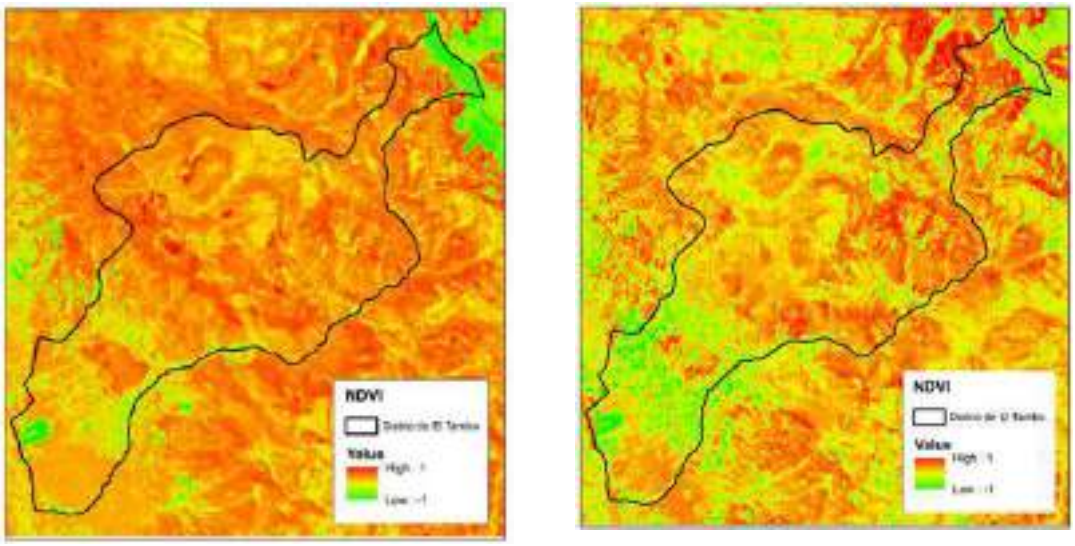


Figura 26. BSI del año 1990
Fuente. Elaboración propia.
Nota: Imagen izquierda BSI del 13/08/1990. Imagen derecha BSI del año 18/02/1990.

4.6.3.2 Generación de áreas (muestras) de entrenamiento.

En la Tabla 25 se presenta la cantidad de áreas por año y categoría que se usaron para la clasificación supervisada. Es importante mencionar que se realizó la distribución no probabilística de estas áreas y que el 67 % se mantuvo igual para todos los años de evaluación.

Tabla 25. Cantidad de áreas de entrenamiento para la clasificación supervisada de los años 1990, 2003, 2013 y 2023

Número	Código	Descripción	Año 2023	Año 2013	Año 2003	Año 1990
1	AUR	Áreas urbanizadas	16	16	16	14
2	CULT	Áreas agrícolas heterogéneas	23	23	23	26
3	BOS	Bosque	15	15	11	11
4	HERA	Herbazal abierto	24	26	26	24
5	HERD	Herbazal denso	14	14	14	14
6	AR-TD	Afloramientos rocosos y tierras desnudas	9	9	11	9
7	GLA	Glaciares	9	9	9	9
8	BOF	Turberas y bofedales	11	11	11	11
9	AGU	Cuerpos de agua	6	6	6	6
Total áreas de entrenamiento			**127**	**129**	**127**	**124**

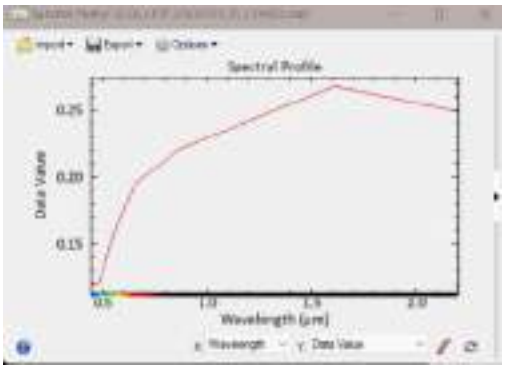
Fuente. Elaboración propia.

Con la finalidad de delimitar áreas de entrenamiento representativas de cada categoría se integró la información de las imágenes de Google Earth, información secundaría, combinación RGB (ver Anexo 2) e información de campo (ver Anexo 2 y 3). Además, se realizó el análisis de las firmas espectrales y el análisis de separabilidad de Jeffries-Matusita y la Divergencia Transformada.

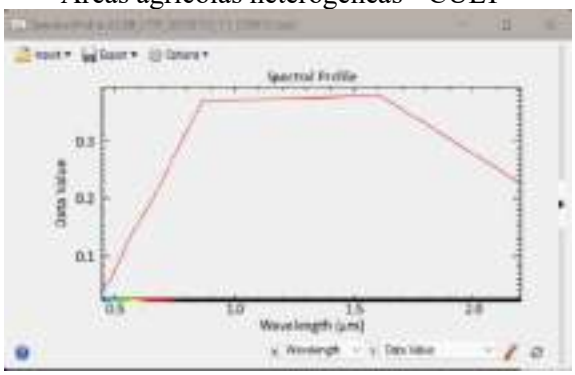
4.6.3.2.1Análisis de las firmas espectrales

En el programa ENVI 5.6 se utilizó la herramienta "Spectral profile" para ver las firmas espectrales de las áreas de entrenamiento y así ir modificando las áreas hasta obtener polígonos con la mayor representatividad a nivel espectral de cada categoría y uso de suelo. Tal como se observa en la Figura 27 y la Figura 28 el bosque (BOS) y las turberas bofedales (BOF); así como las áreas agrícolas heterogéneas (CULT) y el herbazal denso (HERD) presentaron una similitud espectral. Sin embargo, esas categorías se presentan en altitudes diferentes, por lo que en la etapa de edición vectorial se corrigieron las áreas que se confundieron. En el Anexo 5, se observan las firmas espectrales representativas obtenidas en el programa ENVI 5.6 para el año 2023.

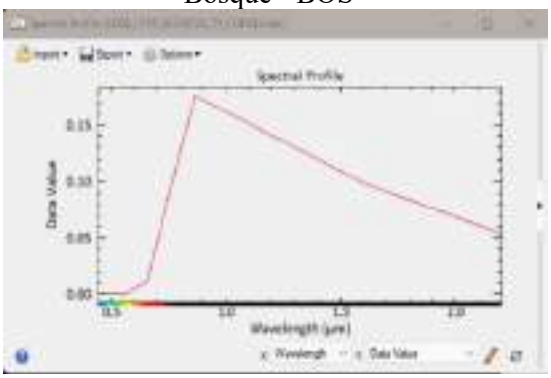
Áreas urbanizadas - AUR



Áreas agrícolas heterogéneas - CULT



Bosque - BOS



Herbazal abierto - HERA

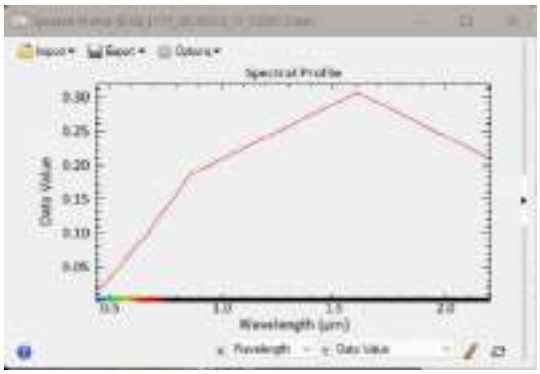
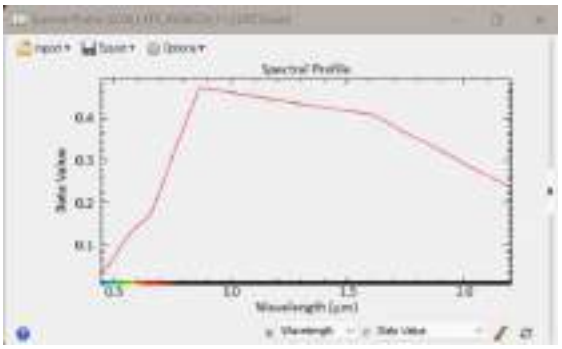
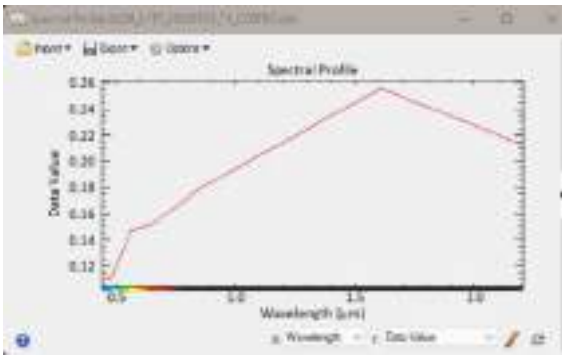


Figura 27. Firmas espectrales representativas – parte 1
Fuente. Elaboración propia.

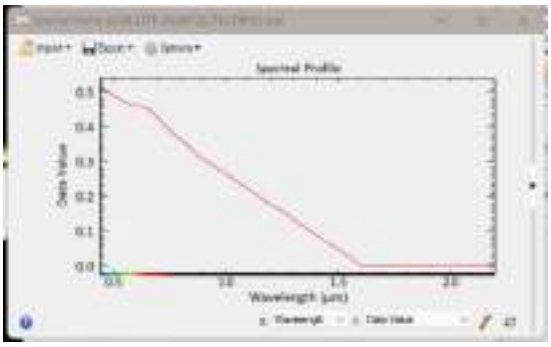
Herbazal denso - HERD



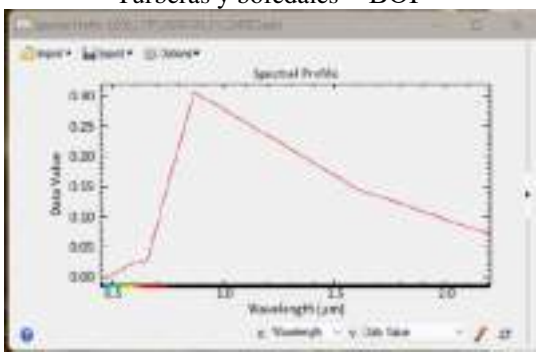
Afloramientos rocosos y tierras desnudas – AR-TD



Glaciares - GLA



Turberas y bofedales – BOF



Cuerpos de agua – AGU

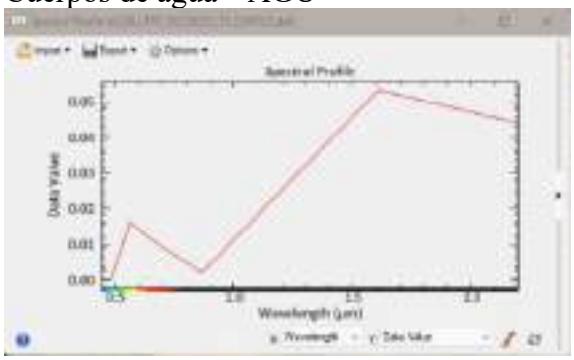


Figura 28. Firmas espectrales representativas – parte 2
Fuente. Elaboración propia.

4.6.3.2.2 Análisis de separabilidad de Jeffries-Matusita y la Divergencia Transformada

En el programa ENVI 5.6 se analizaron las métricas de separabilidad de Jeffries-Matusita y la Divergencia Transformada de las áreas de entrenamiento. Los valores mayores a 1.8 indican una buena separabilidad espectral e influyen para tener mayor precisión en la clasificación supervisada. En el Anexo 6, se presentan los resultados de los años 2023, 2013, 2003 y 1990. A diferencia del análisis anterior, este método analiza a todo el grupo de las áreas en un solo proceso.

En el año 2023, la mayoría de los pares de categorías presentaron valores mayores a 1.9 a excepción de 2 pares: herbazal denso (HERD) - áreas agrícolas heterogéneas (CULT); y turberas y bofedales (BOF) - bosque (BOS) que tuvieron el valor de 1.8 (ver Tabla 26). En el año 2013, el par de categoría HERD - CULT presentó el valor de 1.7 (ver Tabla 27). En el año 2003 los pares HERD - CULT y BOF - HERD tuvieron valores de 1.8 (ver Tabla 28); y para el año 1990, los pares HERD - CULT y BOF - HERD tuvieron valores de 1.7 (Tabla 29).

En general, las áreas de entrenamiento tuvieron valores mayores a 1.8 que sugieren una separabilidad espectral aceptable. Las categorías de herbazal denso (HERD), áreas agrícolas heterogéneas (CULT); turberas y bofedales (BOF); y bosque (BOS) fueron propensas a confundirse. Sin embargo, es importante precisar que geográficamente se ubican en altitudes diferentes. Por ejemplo, el herbazal denso (HERD) se ubica a una altitud mayor a 3500 m s. n. m. mientras que las áreas agrícolas heterogéneas (CULT) y bosque (BOS) se ubican en la parte baja y media del distrito. En el caso de las turberas y bofedales (BOF) y herbazal denso (HERD), se revisó con mayor detalle los índices BSI, NDVI, imágenes de Google Earth, combinaciones RGB (ver Anexo 2), imagen Landsat complementaria del año 1990 e imagen CBER del año 2023 (ver Anexo 2) para delimitar con mayor precisión las áreas de entrenamiento de estas categorías.

Tabla 26. Valores de separabilidad espectral de las áreas de entrenamiento – año 2023

Categorías	AUR	CULT	BOS	HERA	HERD	AR-TD	GLA	BOF	AGU
AUR	0.0								
CULT	2.0	0.0							
BOS	2.0	2.0	0.0						
HERA	2.0	1.9	2.0	0.0					
HERD	2.0	1.8	2.0	2.0	0.0				
AR-TD	1.9	2.0	2.0	1.9	2.0	0.0			
GLA	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	0.0		
BOF	2.0	1.9	1.8	2.0	2.0	2.0	2.0	0.0	
AGU	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	0.0

Fuente. Elaboración propia.

Tabla 27. Valores de separabilidad espectral de las áreas de entrenamiento – año 2013

Categorías	AUR	CULT	BOS	HERA	HERD	AR-TD	GLA	BOF	AGU
AUR	0.0								
CULT	2.0	0.0							
BOS	2.0	2.0	0.0						
HERA	2.0	1.8	2.0	0.0					
HERD	2.0	1.7	2.0	2.0	0.0				
AR-TD	1.9	2.0	2.0	2.0	2.0	0.0			
GLA	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	0.0		
BOF	2.0	1.9	1.8	2.0	2.0	2.0	2.0	0.0	
AGU	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	0.0

Fuente. Elaboración propia.

Tabla 28. Valores de separabilidad espectral de las áreas de entrenamiento – año 2003

Categorías	AUR	CULT	BOS	HERA	HERD	AR-TD	GLA	BOF	AGU
AUR	0.0								
CULT	2.0	0.0							
BOS	2.0	1.9	0.0						
HERA	2.0	1.9	2.0	0.0					
HERD	2.0	1.8	2.0	1.9	0.0				
AR-TD	2.0	1.9	2.0	1.9	2.0	0.0			
GLA	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	0.0		
BOF	2.0	1.9	1.9	2.0	1.8	2.0	2.0	0.0	
AGU	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	1.9	2.0	2.0	0.0

Fuente. Elaboración propia.

Tabla 29 Valores de separabilidad espectral de las áreas de entrenamiento – año 1990

Categorías	AUR	CULT	BOS	HERA	HERD	AR-TD	GLA	BOF	AGU
AUR	0.0								
CULT	1.8	0.0							
BOS	2.0	1.8	0.0						
HERA	2.0	1.8	2.0	0.0					
HERD	2.0	1.7	2.0	1.8	0.0				
AR-TD	1.9	1.9	2.0	1.9	2.0	0.0			
GLA	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	0.0		
BOF	2.0	1.8	1.8	2.0	1.7	2.0	2.0	0.0	
AGU	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	1.9	2.0	2.0	0.0

Fuente: Elaboración propia.

4.6.3.3 Clasificación supervisada.

Se evaluaron de forma preliminar 3 logaritmos diferentes del programa ENVI 5.6: Support Vector Machine o Máquinas de Soporte (SVM); Minimun Distance Classification o Distancia Mínima; y la clasificación de Maximum Likelihood Classification (MLC) o Clasificación de Máxima Verosimilitud. El último tuvo una clasificación con mejor resultado, por ello se eligió para clasificar las imágenes satelitales de todos los años.

Tal como se observa en la Figura 29, se cargó la imagen satelital corregida (radiométrica y atmosférica) y el archivo shapefile con las áreas de entrenamiento según el año de evaluación (1990, 2003, 2013 y 2023). Posteriormente, se eligió el algoritmo de Clasificación de Máxima Verosimilitud, se dejaron los parámetros por defecto y se guardó el resultado (ver Figura 30).

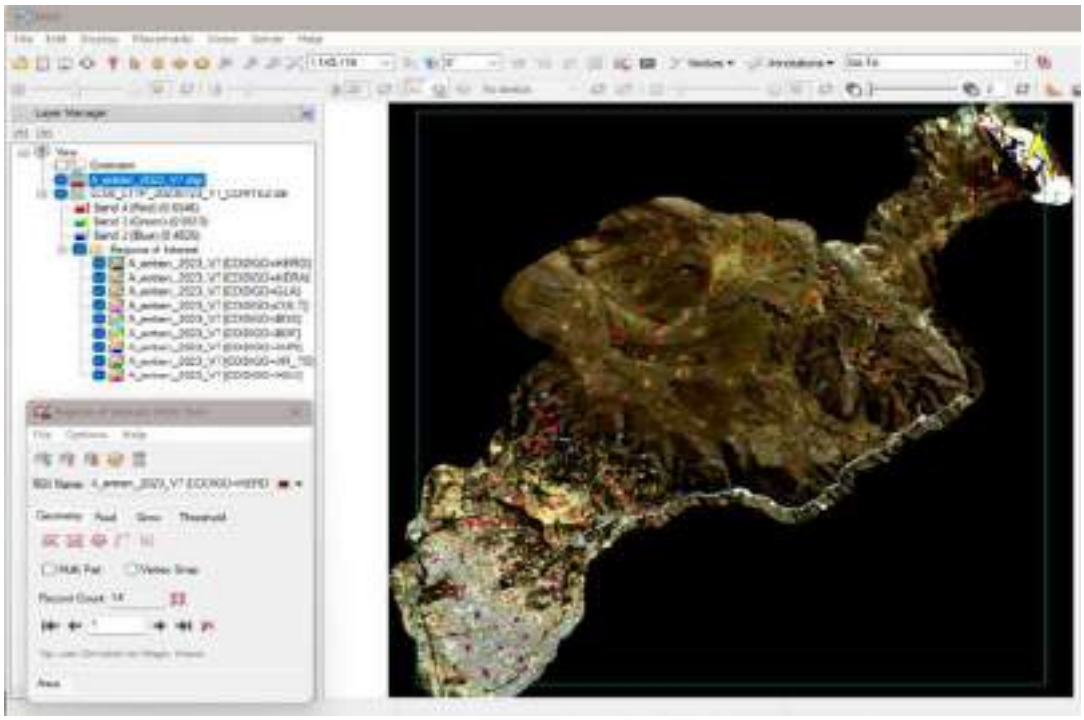


Figura 29. Imagen satelital y áreas de entrenamiento cargados en el programa ENVI para la clasificación supervisada del año 2023
Fuente. Elaboración propia.

Figura 30. Parámetros para la Clasificación de Máxima Verosimilitud
Fuente. Elaboración propia.

Los resultados de la clasificación supervisada de los años 2023, 2013, 2003 y 1990 se muestran en la Figura 31, Figura 32, Figura 33 y Figura 34 respectivamente. En general, se observa que la categoría de áreas urbanizadas (AUR) y áreas agrícolas heterogéneas (CULT) se ubican en la parte baja del distrito. El bosque (BOS) se ubica en la parte media del distrito y el resto de las categorías de cobertura y uso de suelo se ubican en la parte alta.

Se precisa que, la resolución espacial de las imágenes Landsat de 30 m limitaron la identificación de categorías pequeñas y dispersas como los cuerpos de agua (especialmente lagunas) y las turberas y bofedales. Estas categorías son relevantes por los servicios ecosistémicos que ofrecen y se requiere identificarlos con mayor detalle. Por ello, con la finalidad de realizar una mejor identificación y delimitación se integró el uso de los índices espectrales (NDVI, BSI), combinaciones RGB (ver Anexo 2), análisis interdependiente, imágenes de Google Earth y CBERS (resolución 8 m, solo para el año 2023 ver Anexo 2); y la verificación puntual de un bofedal en campo. En conjunto, estos permitieron mejorar la confiabilidad dentro de los límites de la resolución espacial de las imágenes Landsat.

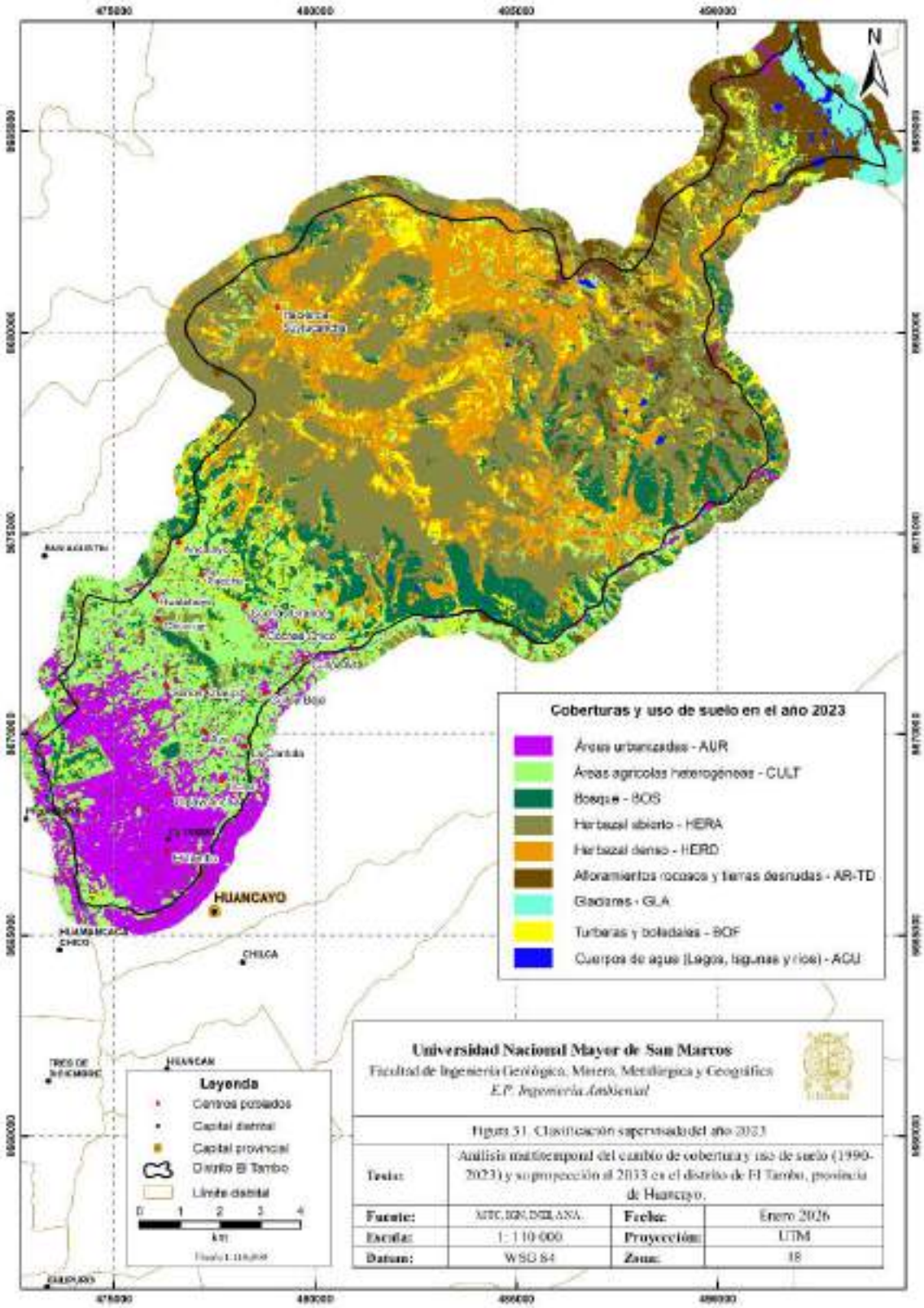


Figura 31. Clasificación supervisada del año 2023
Fuente. Elaboración propia.

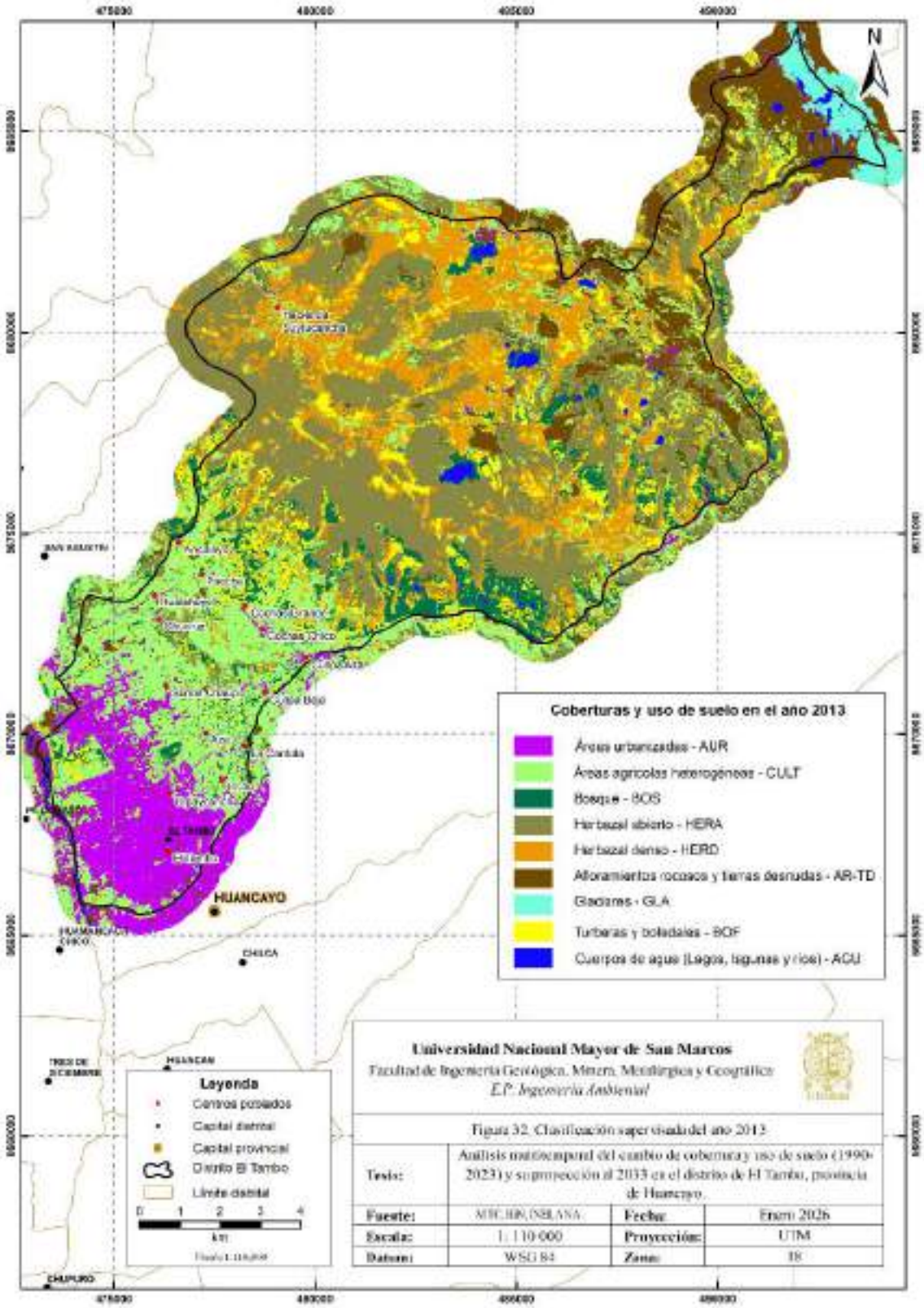


Figura 32. Clasificación supervisada del año 2013
Fuente. Elaboración propia.

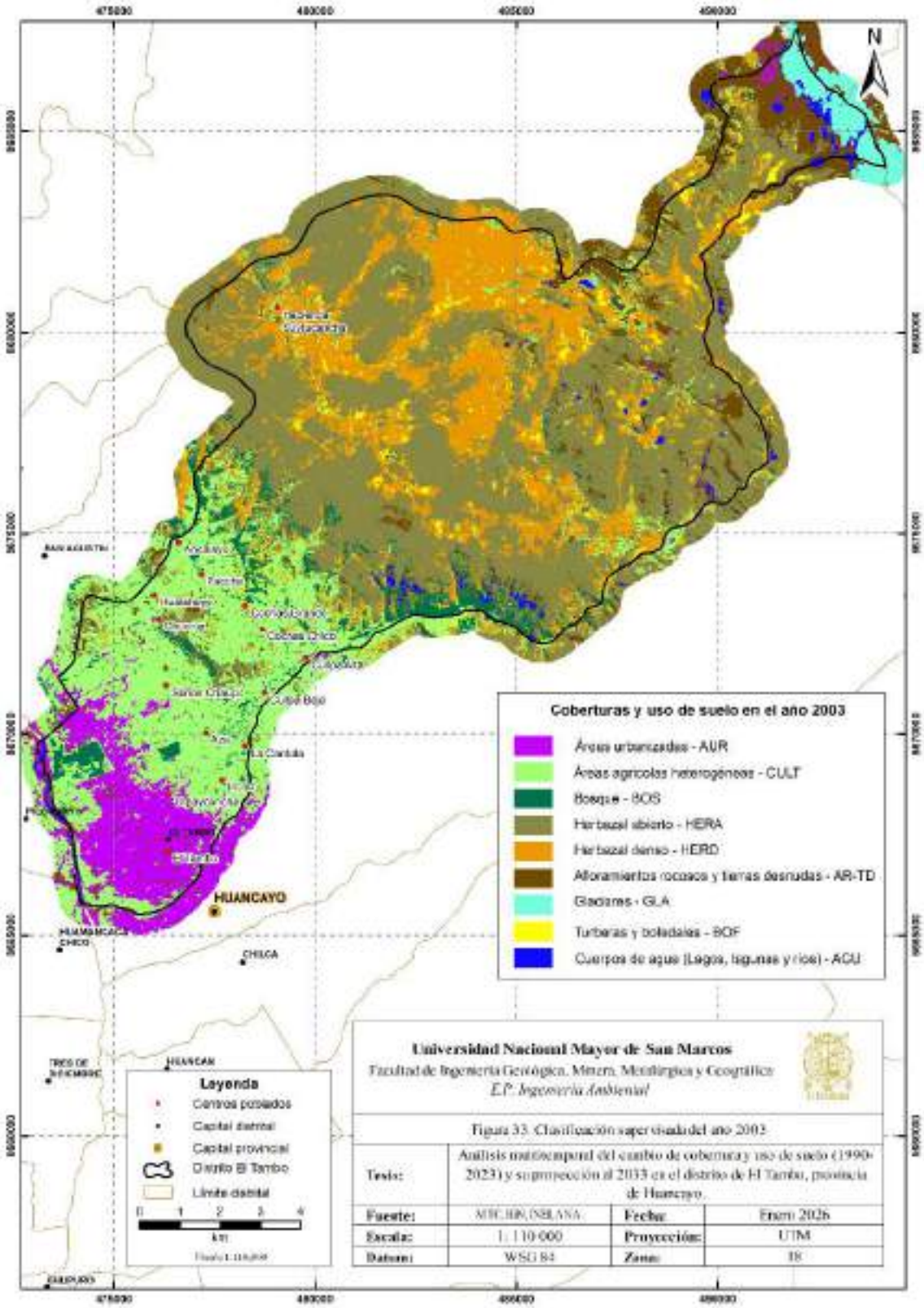


Figura 33. Clasificación supervisada del año 2003
Fuente. Elaboración propia.

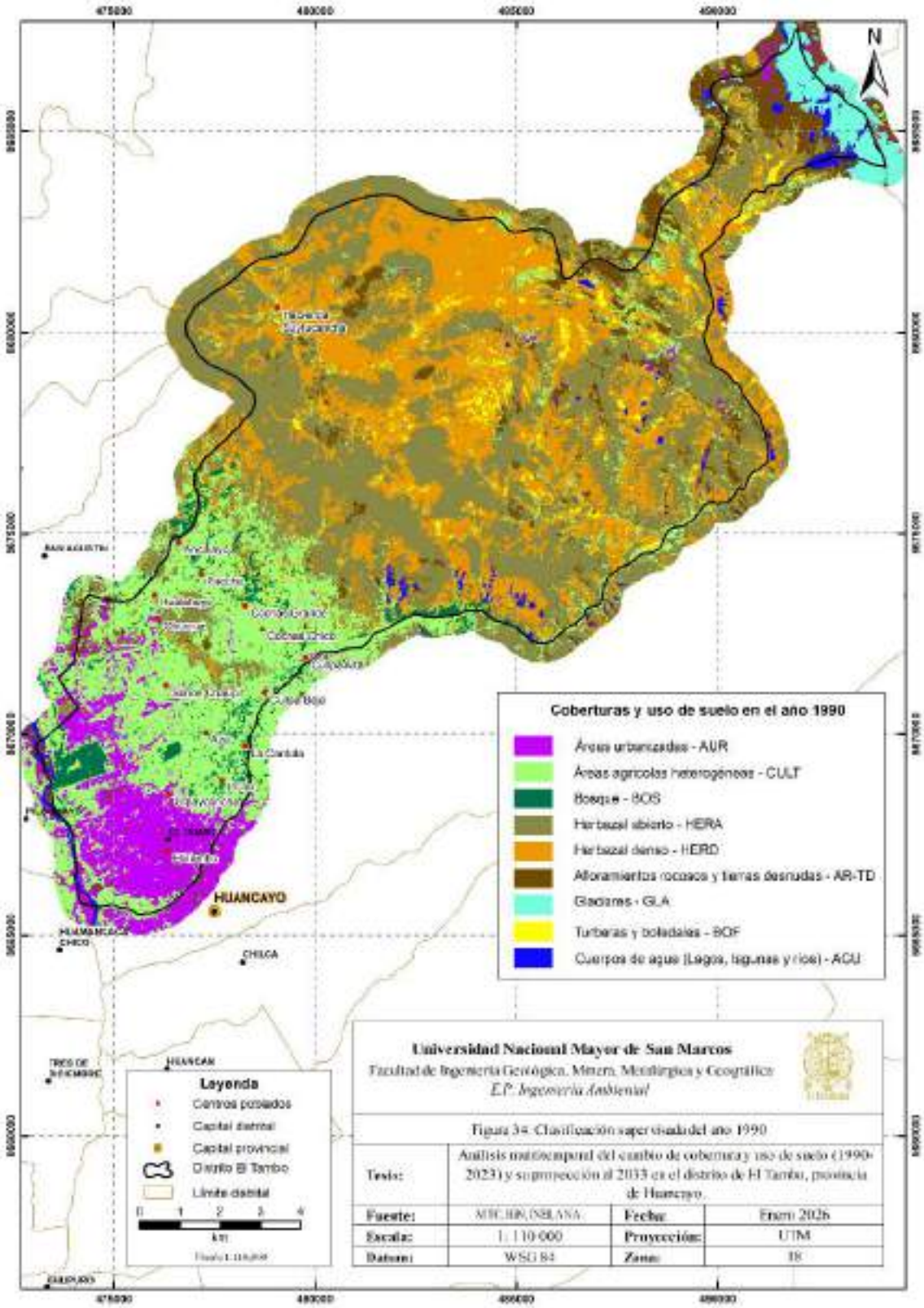


Figura 34. Clasificación supervisada del año 1990
Fuente. Elaboración propia.

4.6.3.4 Evaluación de la exactitud temática.

Se utilizaron las áreas (muestras) de validación y las imágenes de la clasificación supervisada para generar la matriz de confusión; y calcular los índices de Kappa y QADI que indican el nivel de exactitud temática.

4.6.3.4.1 Cantidad y distribución de puntos (muestras) de validación

Se usó la ecuación 1 para calcular la cantidad de muestras y la delimitación se realizó en base a la integración de la visualización de imágenes de Google Earth, información secundaria de fuentes oficiales, índices espectrales (NDVI, BSI), combinaciones RGB (ver Anexo 2) y puntos GPS observados en campo (ver Anexo 2 y 3).

$$n = \frac{Z^2 p(qN)}{(N-1)E^2 + Z^2 pq} \quad \text{-----(Ecuación 1)}$$

Dónde:

Z: Es el valor de la curva normal estandarizada para un nivel determinado de probabilidad, 1.96 (95 %).

p: Indica el porcentaje de aciertos estimado, 0.50 (50 %).

q: Indica el porcentaje de errores (q = 1 – p), 0.50 (50 %).

N: Tamaño de la población.

E: El error permitido, 0.05 (5 %).

El valor de N, considerado como el tamaño de la población corresponde a la extensión superficial del distrito de El Tambo, se usó 16 632.72 ha ya que es el área que resulta del corte de la imagen satelital (formato raster) con el límite distrital (formato shapefile).

$$n = \frac{(1.96)^2 * 0.5 * 0.5 * 16632.72}{(16632.72-1)*(0.05)^2 + (1.96)^2 * (0.5*0.5)}$$

$$n = 375.51 \cong 376$$

La distribución se realizó mediante el muestreo probabilístico aleatorio estratificado y se consideró lo descrito por Congalton (1991) donde sugiere por lo menos tener 50 muestras en cada clase o categoría, llegando a 75 o 100 en caso de que sea un área muy extensa (más de 404 685.64 ha) o si hay más de 12 categorías. Además, menciona que, se puede ajustar la cantidad de muestras según la importancia o interés de

la categoría, así como la variabilidad que tienen en el tiempo. Considerando los criterios señalados anteriormente y la superficie preliminar observable de cada cobertura en la clasificación supervisada, se distribuyeron las muestras tal como se observa en la Tabla 30.

Tabla 30. Cantidad de muestras para la evaluación de la exactitud temática

Número	Descripción	Código	Cantidad de muestras
1	Áreas urbanizadas	AUR	50
2	Áreas agrícolas heterogéneas	CULT	50
3	Bosque	BOS	50
4	Herbazal abierto	HERA	54
5	Herbazal denso	HERD	47
6	Afloramientos rocosos y tierras desnudas	AR-TD	30
7	Glaciares	GLA	30
8	Turberas y bofedales	BOF	40
9	Cuerpos de agua	AGU	25
	Total		**376**

Fuente: Elaboración propia.

Para la distribución aleatoria estratificada de las muestras de validación se inició convirtiendo el raster de la clasificación supervisada del año 2023 a shapefile para obtener de forma preliminar y referencial los polígonos de cada cobertura y uso de suelo. Estos fueron separados para distribuir los puntos definidos para cada categoría usando la herramienta “Create Random Points” del programa ArcGIS 10.8.1. Por ejemplo, en la Figura 35 se observa el polígono preliminar de las áreas urbanizadas en el 2023 y en la Figura 36, se presentan los parámetros de la herramienta usada.

Este procedimiento se realizó para todas las categorías del año 2023, y para los otros años la distribución mantuvo el 88.8 % (334) de las muestras ya que el resto varió de acuerdo con los cambios observados.

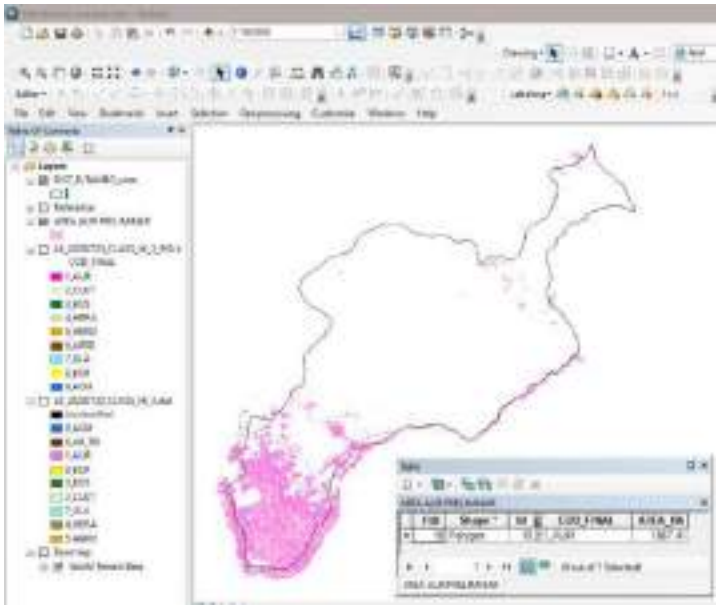


Figura 35. Polígono referencial de las áreas urbanizadas en el año 2023 para la distribución aleatoria estratificada de los puntos de validación
Fuente. Elaboración propia.

Figura 36. Parámetros de la herramienta Create Random Points
Fuente. Elaboración propia.

En el Anexo 7 se presentan las coordenadas y la distribución espacial de todos los puntos de validación usados en los años 2023, 2013, 2003 y 1990. Además, en el Anexo 4 se presenta información de diferentes puntos tomados en campo, algunos estuvieron

cerca de los puntos de validación. Es importante precisar, que después de distribuir las muestras (puntos) se realizaron polígonos con la finalidad de obtener mayor cantidad de píxeles de validación, como resultado se obtuvieron 3 918 píxeles para el año 2023, 3 919 para el año 2013, 3 907 para el año 2003 y 3 934 píxeles para el año 1990.

4.6.3.4.2 Matriz de confusión

Se usó la herramienta "Confusion Matrix Using Ground Truth ROIs" del programa ENVI 5.6 para generar la matriz de confusión, el índice de Kappa y la precisión global. Esta herramienta requiere 2 parámetros de ingreso, el primero corresponde a la imagen clasificada de los años 2023, 2013, 2003 o 1990; y el segundo es el shapefile de las áreas de validación de cada año. En la Figura 37 se observa los parámetros de entrada para el año 2023; y en la Figura 38, la matriz de confusión, el índice de Kappa y el valor de precisión global del mismo año.

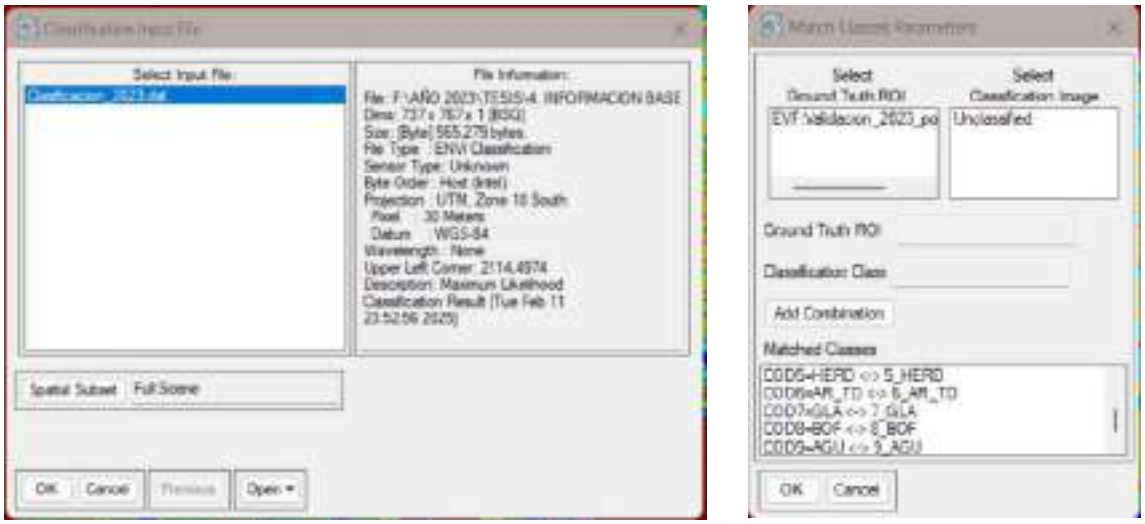


Figura 37. Parámetros de la herramienta "Confusion Matrix Using Ground Truth ROIs"
Fuente. Elaboración propia.

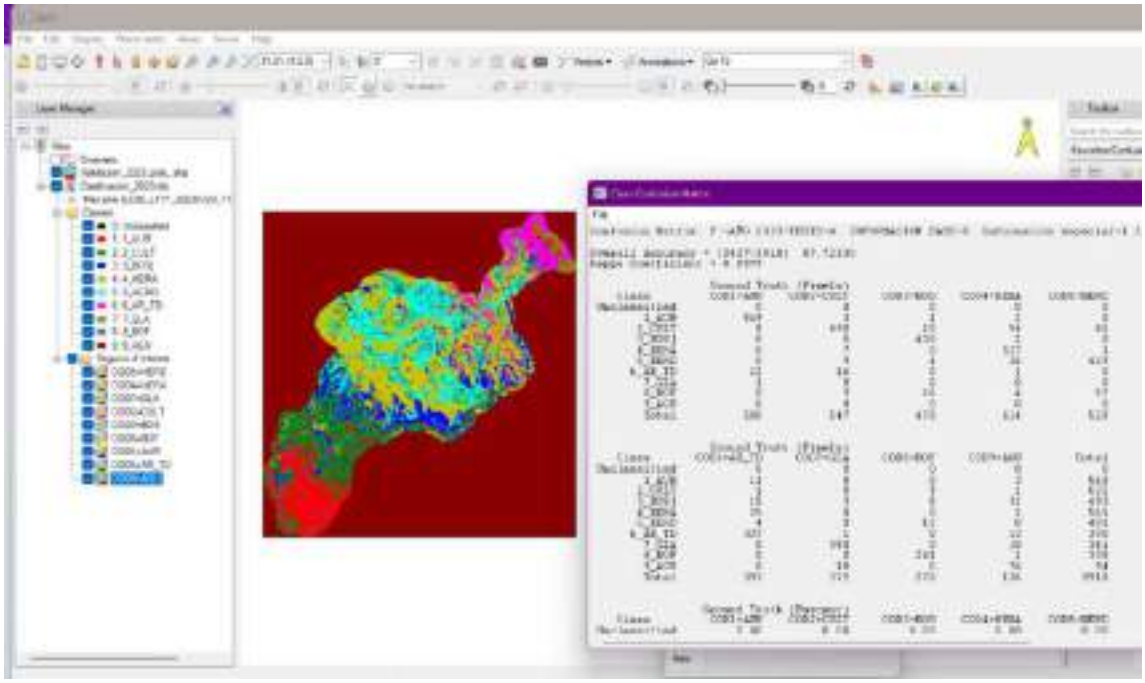


Figura 38. Matriz de confusión, índice de Kappa y precisión global del año 2023
Fuente. Elaboración propia.

4.6.3.4.3 Índice de Kappa e Índice QADI

Se instaló la herramienta "QADI_Final" creada por Feizizadeh *et al.* (2022) en el programa ArcGIS 10.8.1. El procedimiento consistió en 2 pasos, se inició creando una tabla con 9 filas y 9 columnas que correspondían al número de categorías de cobertura y uso de suelo; y se completó con los resultados de las matrices de confusión obtenidos en ENVI 5. 6. Luego se abrió la tabla creada, se ingresó el número de categorías de cobertura y uso de suelo y se indicó la ruta para guardar los resultados. En la Figura 39 se observan los parámetros de ingreso de la herramienta "QADI_Final" del paso 1 y también del paso 2 para obtener el índice QADI del año 2023; y en la Figura 40 se observa el gráfico resultante.

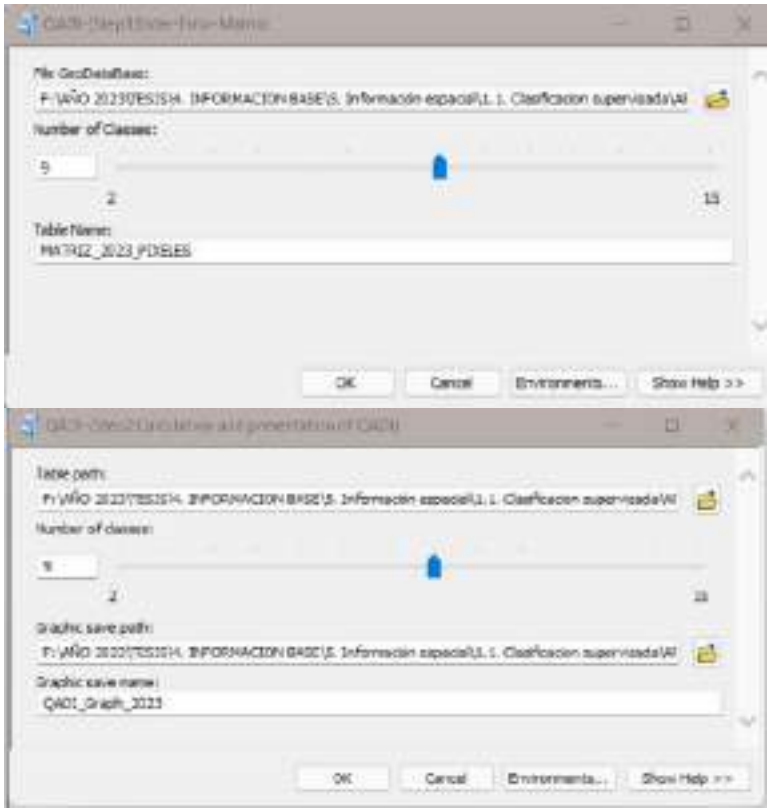


Figura 39. Parámetros de la herramienta "QADI_Final"
Fuente. Elaboración propia.

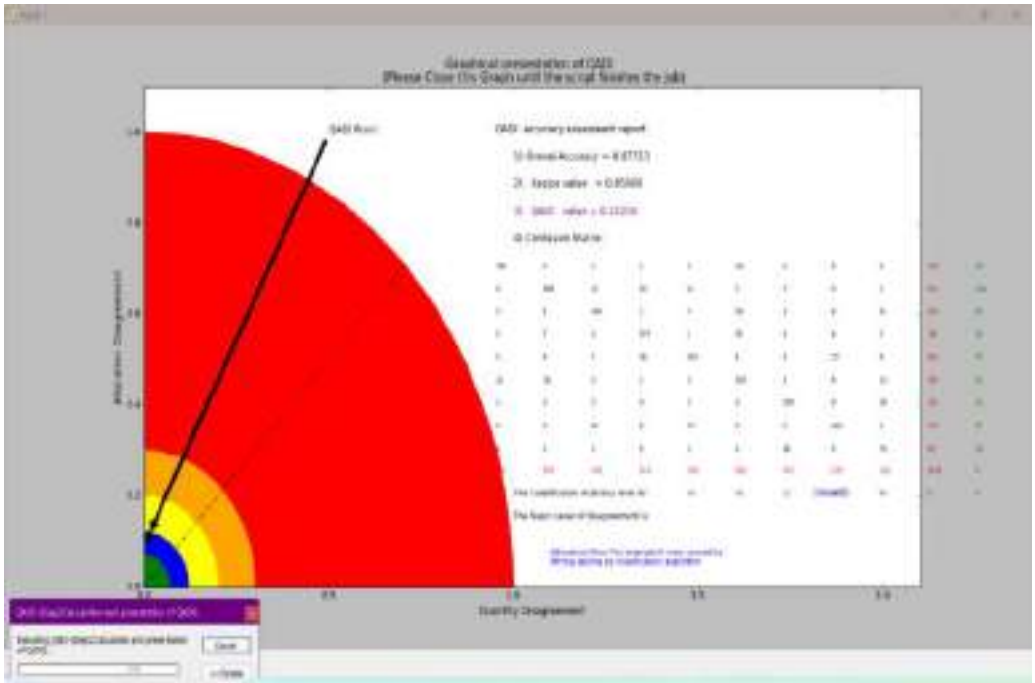


Figura 40. Gráfico del índice QADI del año 2023
Fuente. Elaboración propia.

4.6.4 Posprocesamiento

Se realizó la edición vectorial en el programa ArcGIS 10.8.1 para corregir las áreas donde se generó una clasificación errónea. Se revisaron las imágenes de Google Earth; índices NDVI y BSI de los años 1990, 2003, 2013 y 2023; CBER (solo para el año 2023); combinaciones RGB (ver Anexo 2) y lo observado en campo. Adicionalmente, se realizó de forma complementaria la Interpretación Visual interdependiente solo para las categorías de turberas y bofedales; y cuerpos de agua.

Los archivos editados se convirtieron a formato raster para realizar el análisis de cambio de cobertura y uso de suelo en los programas ArcGIS 10.8.1 y Excel; y el análisis de intensidad de cambio en RStudio.

4.6.5 Análisis del cambio de cobertura y uso de suelo

Se realizó el cálculo de superficie de cada categoría según el año de evaluación (1990, 2003, 2013 y 2023), los resultados se organizaron en tablas y gráficos (barra y tendencia). También, se realizaron diferentes mapas en ArcGIS 10.8.1 para visualizar la distribución espacial de las categorías. Adicionalmente, se utilizó la herramienta "Combine" de ArcGIS 10.8.1 para identificar cuáles fueron las transiciones de las categorías de cobertura y uso de suelo en los periodos 1990-2003, 2003-2013, 2013-2023 y 1990-2023. Adicional a ello, se realizó el análisis de intensidad de cambio creado por Aldwaik & Pontius Jr. (2012) y que se describe a continuación:

4.6.5.1 Análisis de intensidad de cambio.

Se utilizaron los programas QGIS 3.28.15. y RStudio para generar las tablas y gráficos de nivel de intervalo, categoría y transición. A continuación, se describe el proceso:

- Paso 1: Los archivos raster generados en el ítem 2.9.4 (Posprocesamiento) se convirtieron en formato RST (Idrisi Raster A.1) en el programa QGIS 3.28.15.
- Paso 2: Para el análisis de intensidad de cambio, en el programa RStudio se cargó el script creado por Aldwaik & Pontius Jr. (2012), este se actualizó según los datos del proyecto y los nombres de los archivos en formato RST obtenidos en el paso 1 (ver Figura 41 y Anexo 8). Se obtuvieron matrices de cambio; y

los diferentes gráficos de nivel de intervalo de tiempo, nivel de categoría y transición.

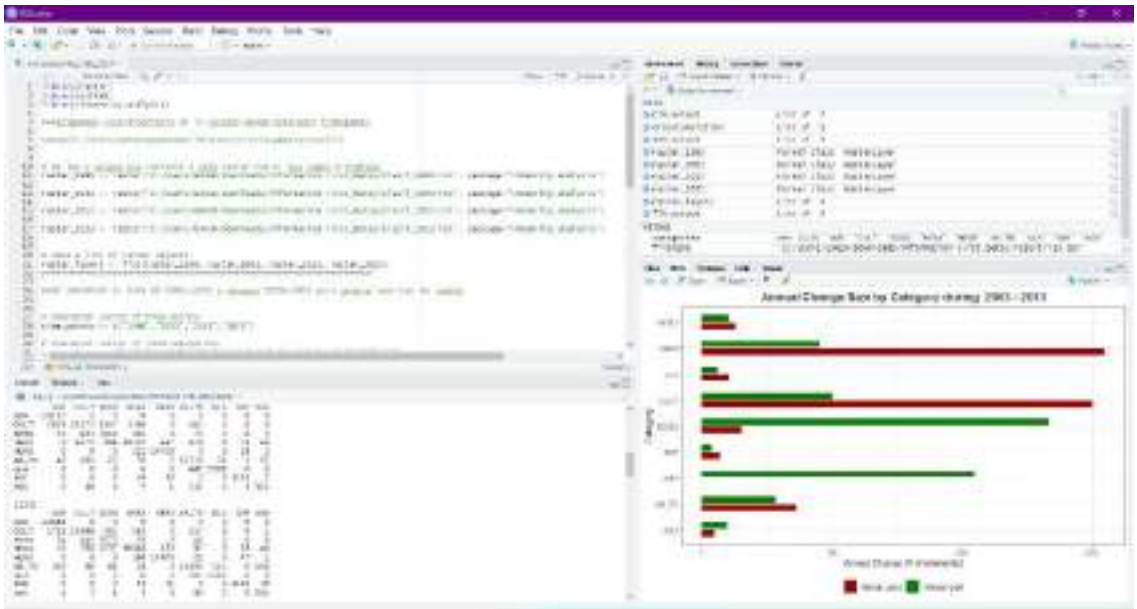


Figura 41. Análisis de intensidad de cambio en el programa RStudio periodo 2003-2013
Fuente. Elaboración propia.

4.6.6 Elaboración de los escenarios prospectivos

Se utilizó el módulo Land Change Modeler (LCM) del programa Terrset 20.02. En términos generales este programa identificó los cambios en el periodo 1990-2023 y en base a impulsores de cambio proyectó el cambio de uso de suelo al 2033. Se proyectó 1 escenario tendencial, 1 escenario restrictivo donde el supuesto considera que no se permita ningún tipo de cambio de cobertura y uso de suelo dentro de las áreas con valor social, cultural y/o ambiental; y 1 escenario restrictivo donde se permita la conversión a bosque (BOS) o áreas agrícolas heterogéneas (CULT) en las áreas restrictivas. En la Tabla 31 se presenta más detalle de los supuestos considerados.

Tabla 31. Transiciones y restricciones consideradas para los escenarios proyectados al 2033

Número	Transiciones	Descripción	Escenario tendencial *	Escenario restrictivo 1**	Escenario restrictivo 2***
1	CULT a AUR	Áreas agrícolas heterogéneas (CULT) a áreas urbanizadas (AUR)	Sí	No	No
2	HERA a BOS	Herbazal abierto (HERA) a bosque (BOS)	Sí	No	Sí
3	CULT a BOS	Áreas agrícolas heterogéneas (CULT) a bosque (BOS)	Sí	No	Sí
4	CULT a HERA	Áreas agrícolas heterogéneas (CULT) a herbazal abierto (HERA)	Sí	No	No
5	GLA a AR-TD	Glaciares (GLA) a afloramientos rocosos y tierras desnudas (AR-TD)	Sí	No	No
6	HERA a CULT	Herbazal abierto (HERA) a áreas agrícolas heterogéneas (CULT)	Sí	No	Sí

Fuente: Elaboración propia.
Nota: (*) No se considera ninguna restricción. (**) Se restringe todo tipo de transición de la cobertura y uso de suelo dentro de las áreas restrictivas. (***) Se restringe solo la conversión hacia áreas urbanizadas o herbazal abierto dentro de las áreas restrictivas.

A continuación, se detalla el procedimiento realizado:

4.6.6.1 Análisis de cambio.

En la pestaña “Change Analysis” (Análisis de Cambio), específicamente en la sección “LCM Session Parameters” se cargaron los archivos en formato RST de la cobertura y uso de suelo de los años 1990 y 2023; y el modelo digital de elevación - DEM Alos (ver Figura 42).

Posteriormente, en la sección “Change Maps”, se generó el mapa de transiciones que representa la distribución espacial de todas las transiciones. En la Figura 43 se observa que la mayoría de las transiciones se han dado en la parte baja y media del distrito, donde resalta la transición de áreas agrícolas heterogéneas (CULT) hacia áreas urbanizadas (AUR) que es de color rojo.

Figura 42. Archivos de entrada para el módulo Land Change Modeler (LCM)
Fuente. Elaboración propia.

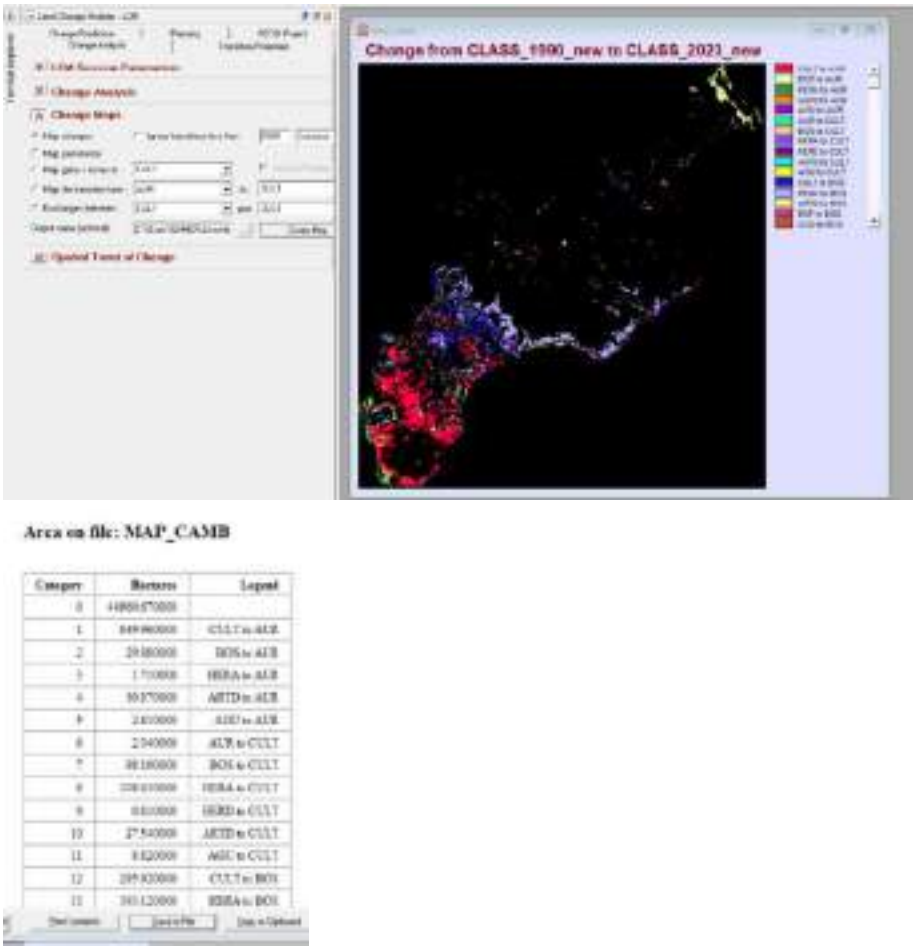


Figura 43. Mapa de transiciones de cobertura y uso de suelo para el periodo 1990-2023
Fuente. Elaboración propia.

4.6.6.2 Potencial de transición.

En la pestaña “Transition Potencial” (potencial de transición) se generan mapas de potencial de transición de un submodelo que agrupa diferentes transiciones y luego se evalúan los impulsores de cambio según V Cramer.

En la sección “Transition Sub – Models: Status” se seleccionaron y agruparon en el submodelo “MODEL1” las 6 primeras transiciones (ver Tabla 32 y Figura 44) que tuvieron mayor superficie de cambio ya que no es posible agrupar todas las transiciones del periodo de evaluación.

Tabla 32. Transiciones elegidas para realizar los escenarios proyectados al 2033

Número	Transiciones	Descripción
1	CULT a AUR	Áreas agrícolas heterogéneas (CULT) a áreas urbanizadas (AUR).
2	HERA a BOS	Herbazal abierto (HERA) a bosque (BOS).
3	CULT a BOS	Áreas agrícolas heterogéneas (CULT) a bosque (BOS).
4	CULT a HERA	Áreas agrícolas heterogéneas (CULT) a herbazal abierto (HERA).
5	HERA a CULT	Herbazal abierto (HERA) a áreas agrícolas heterogéneas (CULT).
6	GLA a AR-TD	Glaciares (GLA) a afloramientos rocosos y tierras desnudas AR-TD

Fuente. Elaboración propia.

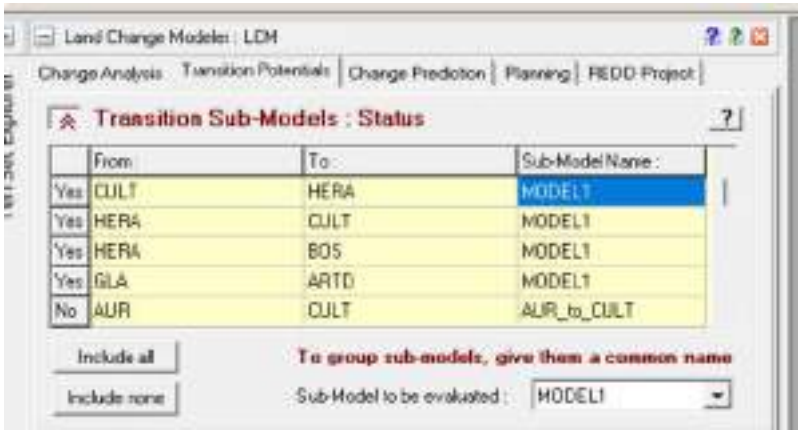


Figura 44. Transiciones elegidas para el submodelo de transición
Fuente. Elaboración propia.

Luego, en la sección “Test and Selection of Site and Driver Variables”, se evaluaron 10 impulsores con V Cramer y en la sección “Transition Sub-Model Structure” se eligieron 9 que tuvieron valores mayores a 0.15 (ver Figura 45). Es importante precisar

que, previamente se revisó bibliografía para poder identificar los impulsores de cambio usados frecuentemente en este tipo de investigaciones: Modelo Digital de Elevación (DEM), pendiente, distancia a vías principales, distancia a vías secundarias, distancia a red hídrica y distancia a centros poblados. Además, se evaluaron 4 variables adicionales: distancia a fuentes de agua (manantiales o punto de salida de agua de acuífero) que tienen el certificado de Derecho de Uso de Agua; puntos georreferenciados de Derechos de Uso de Agua (uso agrario o para el uso poblacional) y habilitaciones urbanas. En el Anexo 9 se observa la representación espacial de las variables y en la Tabla 33 se presentan los valores V Cramer. Se precisa que, para obtener la distancia respecto a las variables, se utilizó la herramienta "Euclidean distance" en el programa ArcGIS 10.8.1.

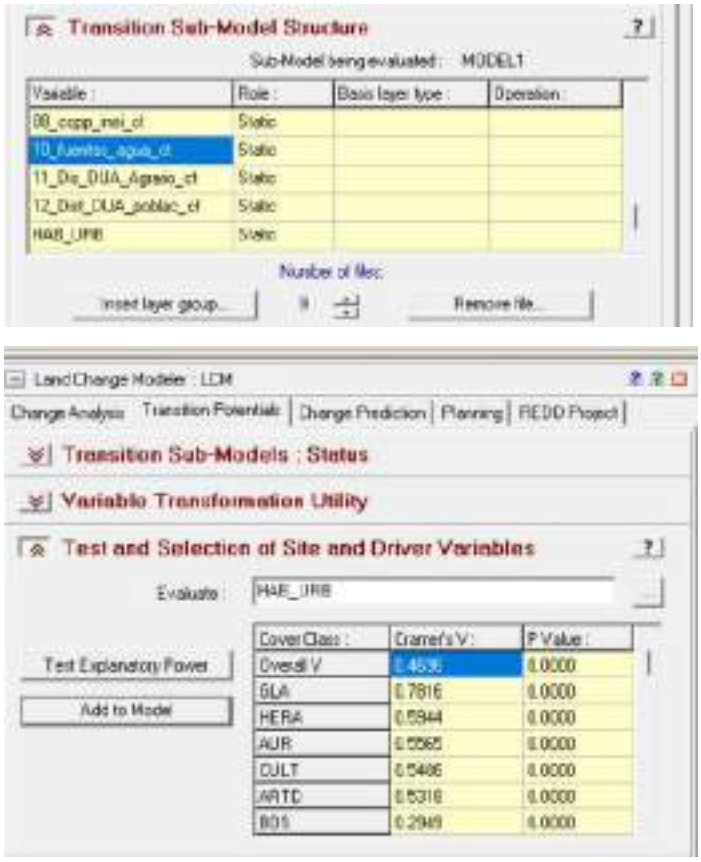


Figura 45. Evaluación de variables con V Cramer
Fuente. Elaboración propia.

Tabla 33. Impulsores de cambio evaluados para la proyección de la cobertura y uso de suelo al 2033

Número	Variables	Descripción	Resultados V Cramer
1	Modelo Digital de Elevación (DEM) (1)	DEM Alos	0.4392
2	Pendiente	Pendiente (%) generada a partir del DEM Alos.	0.0001
3	Distancia a vías principales (2)	Elaboración propia de la distancia respecto a las vías nacional, departamentales y vecinales.	0.2858
4	Distancia a vías secundarias	Elaboración propia a partir de la digitalización de accesos observados en trabajo de campo e imágenes de Google Earth.	0.3689
5	Distancia a red hídrica (3)(4)	Elaboración propia a partir ríos y quebradas.	0.1935
6	Distancia a centros poblados considerados en el INEI (5)	Centros poblados urbanos y rurales.	0.4168
7	Distancia a fuentes de agua (3)	Considera a los manantiales o punto de captación de agua en acuíferos que tienen algún tipo de uso.	0.3964
8	Distancia a derechos de uso de agua - uso agrario (3)	Puntos georreferenciados de todos los usos de agua que existen en el área de estudio para el uso agrario.	0.4372
9	Distancia a derechos de uso de agua - uso poblacional (3)	Puntos georreferenciados de todos los usos de agua que existen en el área de estudio para el uso poblacional.	0.40
10	Habilitaciones urbanas[5]	Áreas de las habilitaciones urbanas aprobadas en el periodo 2017-2021 en el distrito de El Tambo	0.4696

Fuente. (1) Descargado de Global Digital Surface Model "ALOS World 3D – 30m" disponible en https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/aw3d30/registration.htm, (2) Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC, 2018), (3) Infraestructura de Datos Espaciales - SNIRH (Autoridad Nacional del Agua [ANA], 2021), (4) Yaringaño (2019) y (5) Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI, 2017). (5) https://geosenace.senace.gob.pe/portal/apps/experiencebuilder/experience/?id=015cc2527cbc436d9ff325d674d5895a

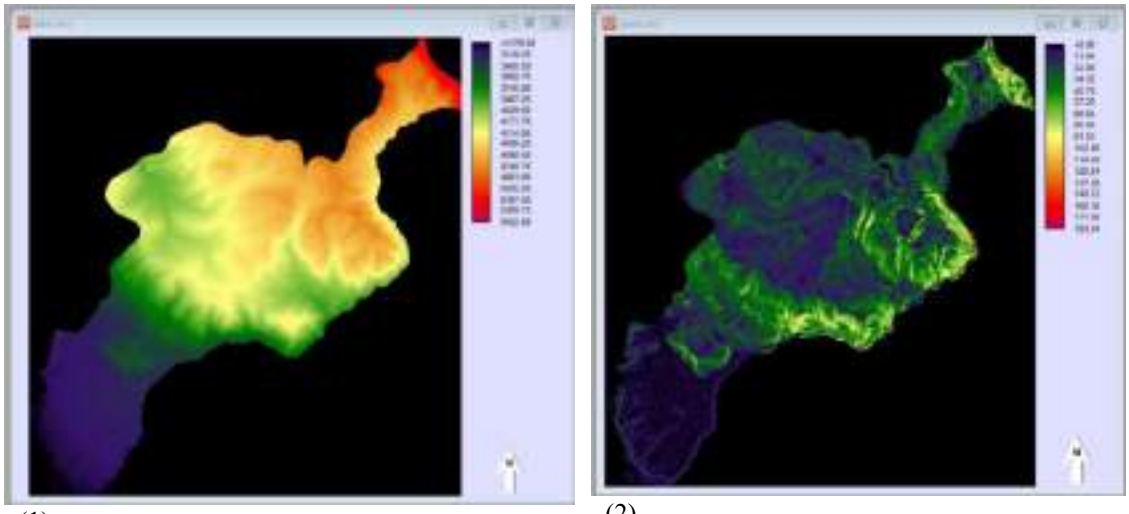
Según los resultados V Cramer, se eligieron 9 variables (Tabla 34) con valores mayores a 0.15.

Tabla 34. Variables elegidas para la proyección de la cobertura y uso de suelo al 2033

Número	Variables	Resultados V Cramer
1	Modelo Digital de Elevación (DEM)	0.4392
2	Distancia a vías principales	0.2858
3	Distancia a vías secundarias	0.3689
4	Distancia a red hídrica	0.1935
5	Distancia a centros poblados considerados en el INEI	0.4168
6	Distancia a fuentes de agua	0.3964
7	Distancia a derechos de uso de agua - uso agrario	0.4372
8	Distancia a derechos de uso de agua - uso poblacional	0.4061
9	Habilitaciones urbanas	0.4696

Fuente. Elaboración propia.

En la Figura 46, Figura 47 y Figura 48 se visualizan las variables en el programa Terrset, los colores cercanos al rojo significan que son áreas más alejadas de las variables, a excepción de las variables Modelo Digital de Elevación (DEM) y la pendiente que representan mayor altitud o pendiente. Además, en la Figura 59 y Figura 60 se observa más detalle de la pendiente y la imagen DEM; y en el Anexo 9 se observan los otros impulsores de cambio evaluados.



(1) (2)

Figura 46. Variables evaluadas para el escenario proyectado de cambio y uso de suelo – parte 1
Fuente. Elaboración propia.
Nota. Variables de cambio evaluadas (1) Modelo Digital de Elevación (DEM), (2) Pendiente. Los valores cercanos al rojo indican mayor altitud o pendiente.

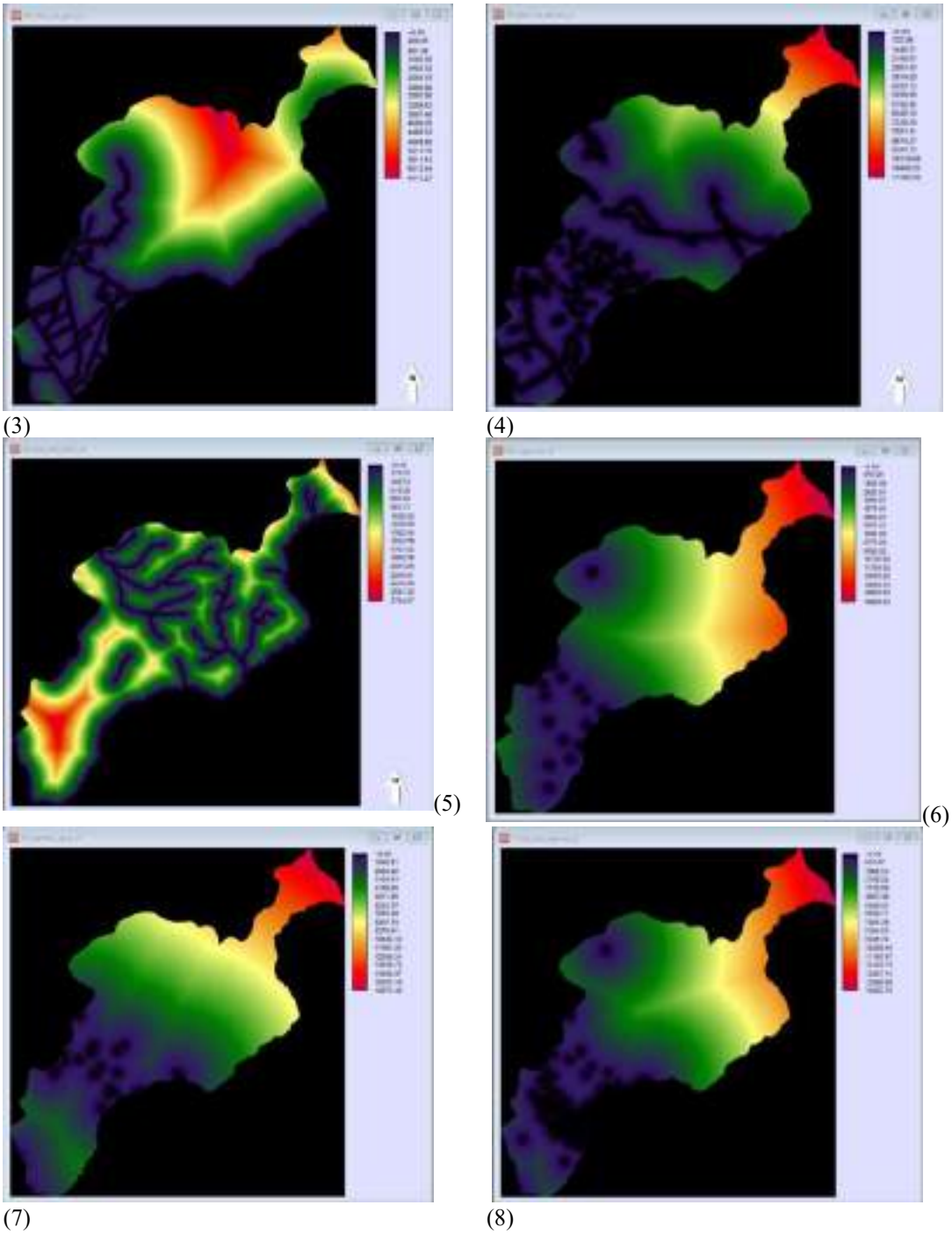
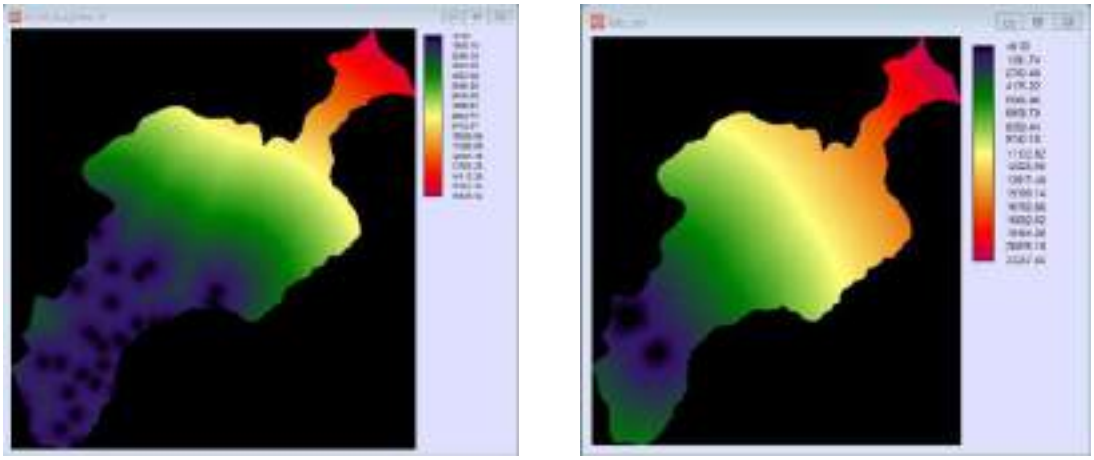


Figura 47. Variables evaluadas para el escenario proyectado de cambio y uso de suelo – parte 2
Fuente. Elaboración propia.
Nota. (3) Distancia a vías principales y (4) Distancia a vías secundarias, (5) Distancia a red hídrica (6) Distancia a centros poblados considerados en el INEI, (7) Distancia a fuentes de agua y (8) Derechos de uso de agua para uso agrario El rango de colores indica la distancia respecto a la variable evaluada, los colores cercanos al rojo indican la lejanía respecto a la variable.



(9) (10)

Figura 48. Variables evaluadas para el escenario proyectado de cambio y uso de suelo – parte 3
Fuente. Elaboración propia.
Nota. (9) Derechos de uso de agua para uso poblacional (10) Habilitaciones urbanas. El rango de colores indica la distancia respecto a la variable evaluada, los colores cercanos al rojo indican la lejanía respecto a la variable.

En la sección "Run Transition Sub – Model" (Ejecutar el submodelo de transición) se realizaron diferentes ensayos cambiando los valores de tamaño de muestra (Sample size per class) y la cantidad de capas ocultas (Hidden layer nodes) hasta obtener una tasa de exactitud mayor a 75 % (Accuracy rate) y valor de testeo (Training RMS) menor a 0.25 que son valores que indican que el modelo es aceptable o idóneo tal como lo sugiere Eastman (2012). Después de realizar varios ensayos, el entrenamiento de la red neuronal artificial (MLP Neural Network) tuvo una tasa de exactitud de 77.66 %, valor de entrenamiento de 0.1872 y valor de testeo de 0.1885 (ver Figura 49), estos resultados cumplen con los requisitos para ser considerados aceptables y válidos para la elaboración de los mapas de potencial de transición y, por ende, la proyección de escenarios al 2033.

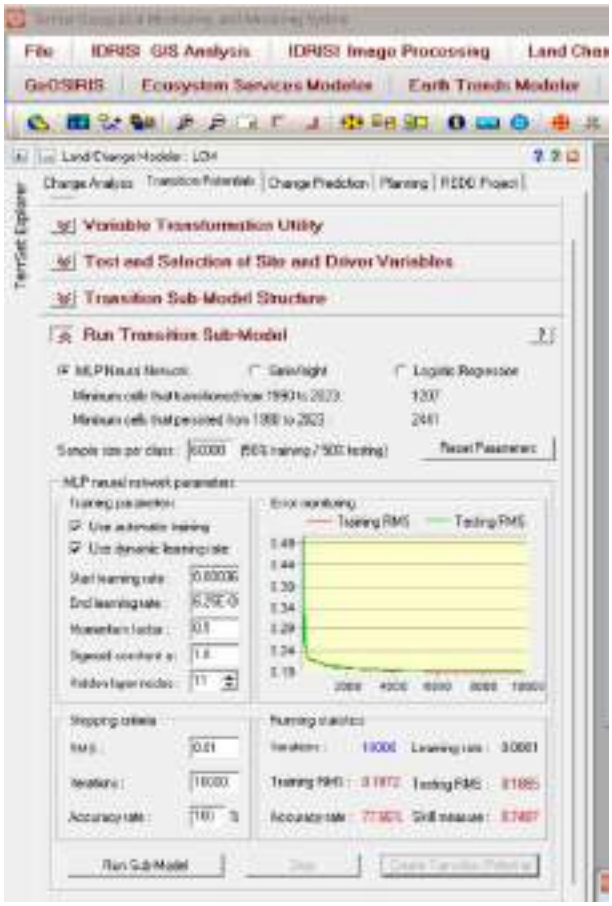


Figura 49. Valores de configuración para el submodelo de transición
Fuente. Elaboración propia.

4.6.6.2.1 Análisis de sensibilidad del modelo de potencial de transición

El submodelo permitió contrastar la influencia de las variables considerando dos condiciones, la primera evaluó la variación en el modelo forzando una variable a ser constante (ver Figura 50); y en la segunda se observó el modelo cuando casi todas las variables son constantes excepto una (ver Figura 51). La precisión global es de 77.66 % lo que indica que todas las variables en conjunto son relevantes para la proyección.

La variable que más influye en el modelo son las habilitaciones urbanas (Var.9) que muestra una precisión de 51.11 % y una medida de habilidad de 0.45, y la menos influyente es la distancia a red hídrica (Var. 4) que tuvo una precisión de 77.55 % y una medida de habilidad de 0.7474 (ver Figura 51). Otras variables que influyen en el modelo son la distancia a fuentes de agua y la distancia a centros poblados.

1. General Model Information

1) Input Files

Independent variable 1	DEM_SINC
Independent variable 2	04_dist_via_prin_ct
Independent variable 3	05_dist_via_secun_ct
Independent variable 4	06_dist_red_hidri_ct
Independent variable 5	08_cepp_inei_ct
Independent variable 6	10_fuentes_agua_ct
Independent variable 7	11_Dis_DUA_Agrario_ct
Independent variable 8	12_Dist_DUA_poblac_ct
Independent variable 9	HAB_URB
Training site file	P_2033_V5_Train_MODEL1

3. Sensitivity of Model to Forcing Independent Variables to be Constant

2) Forcing a Single Independent Variable to be Constant

Model	Accuracy (%)	Skill measure	Influence order
With all variables	77.66	0.7487	N/A
Var. 1 constant	76.23	0.7328	7
Var. 2 constant	75.87	0.7285	6
Var. 3 constant	76.72	0.7381	8
Var. 4 constant	77.55	0.7474	9 (least influential)
Var. 5 constant	65.25	0.6088	3
Var. 6 constant	62.14	0.5741	2
Var. 7 constant	68.14	0.6418	4
Var. 8 constant	74.85	0.7171	5
Var. 9 constant	51.11	0.4500	1 (most influential)

Figura 50. Análisis de sensibilidad del modelo con precisión (%) y medida de habilidad con una variable constante
Fuente. Elaboración propia.

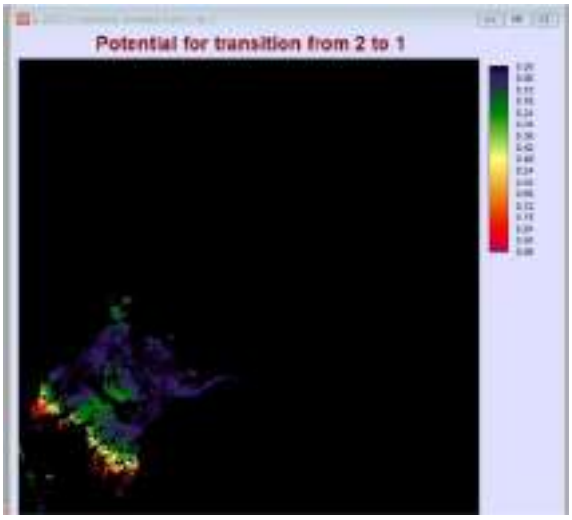
En la segunda condición (ver Figura 51) se observa al modelo con todas las variables y mantiene constante cada una para identificar cuál tiene menor efecto en la habilidad del modelo. Se inicia con el paso 1, donde se mantiene constante la variable menos influyente que es la distancia a red hídrica (Var. 4) y se observa que el modelo tiene una buena exactitud y medida de habilidad de 77.55 %.

3) Backwards Stepwise Constant Forcing

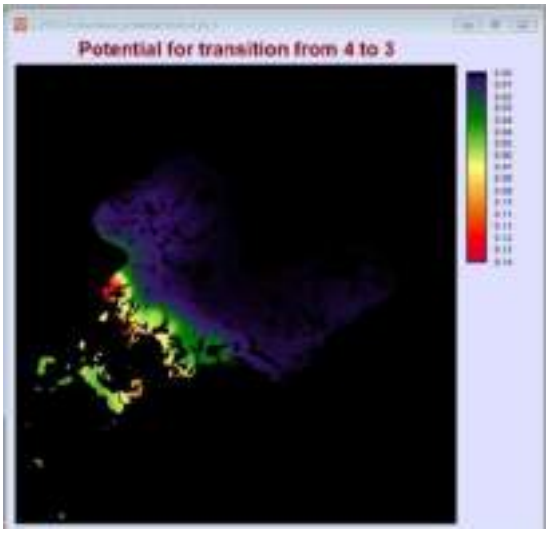
Model	Variables included	Accuracy (%)	Skill measure
With all variables	All variables	77.66	0.7487
Step 1: var.[4] constant	[1,2,3,5,6,7,8,9]	77.55	0.7474
Step 2: var.[4,3] constant	[1,2,5,6,7,8,9]	76.67	0.7375
Step 3: var.[4,3,1] constant	[2,5,6,7,8,9]	74.51	0.7133
Step 4: var.[4,3,1,7] constant	[2,5,6,8,9]	75.21	0.7211
Step 5: var.[4,3,1,7,2] constant	[5,6,8,9]	76.57	0.7364
Step 6: var.[4,3,1,7,2,8] constant	[5,6,9]	74.29	0.7108
Step 7: var.[4,3,1,7,2,8,5] constant	[6,9]	71.02	0.6739
Step 8: var.[4,3,1,7,2,8,5,6] constant	[9]	65.26	0.6091

Figura 51. Análisis de sensibilidad del modelo con precisión (%) y medida de habilidad con todas las variables independientes constantes excepto una
Fuente. Elaboración propia.

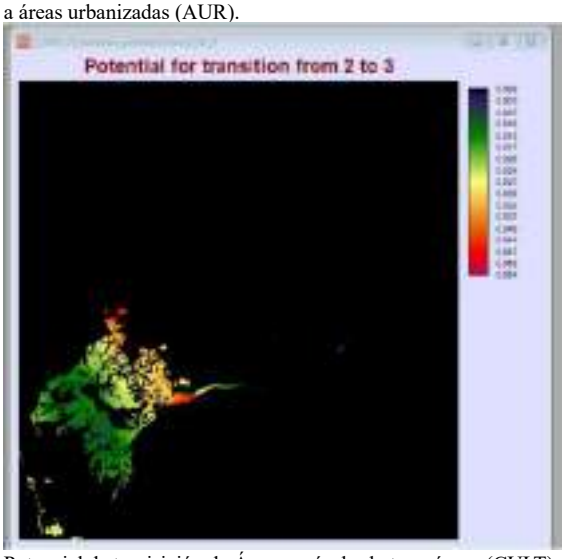
Después de haber logrado los valores recomendados, se ejecutó el botón “Create Transition Potencial” para obtener los diferentes mapas de potencial de transición de cada una de las 6 transiciones elegidas para el modelo. En la Figura 52 y la Figura 53, las zonas más cercanas al rojo indican que hay una alta probabilidad de transición mientras que los que se acercan al color verde, indican una baja probabilidad.



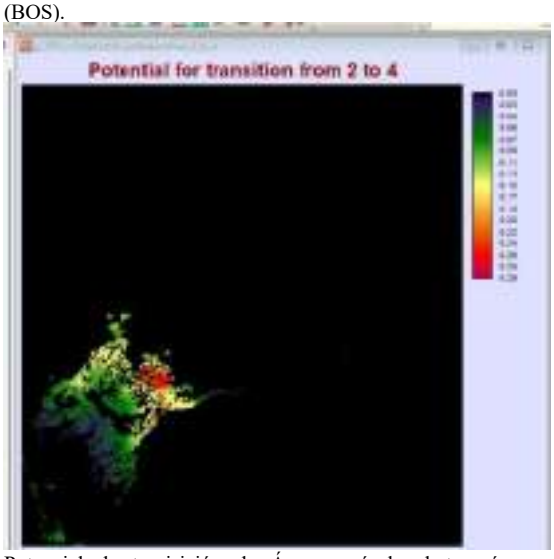
Potencial de tranisición de Áreas agrícolas heterogéneas (CULT) a áreas urbanizadas (AUR).



Potencial de tranisición de Herbazal abierto (HERA) a bosque (BOS).



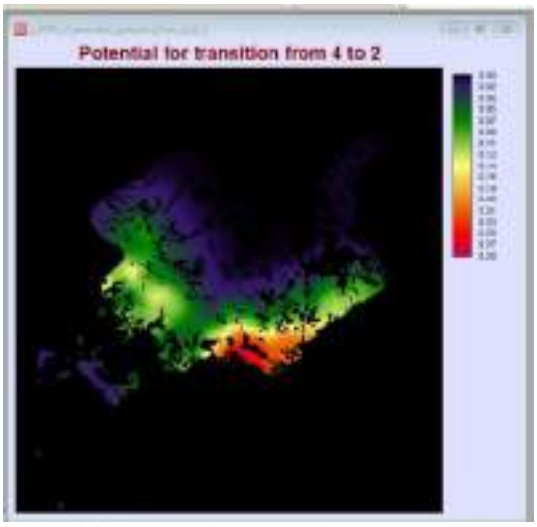
Potencial de tranisición de Áreas agrícolas heterogéneas (CULT) a bosque (BOS).



Potencial de tranisición de Áreas agrícolas heterogéneas (CULT) a herbazal abierto (HERA).

Figura 52. Potencial de transición – parte 1

Fuente. Elaboración propia.



Potencial de transición de Herbazal abierto (HERA) a áreas agrícolas heterogéneas (CULT).

Potencial de transición de Glaciares (GLA) a afloramientos rocosos y tierras desnudas AR-TD.

Figura 53. Potencial de transición – parte 2
Fuente. Elaboración propia.

4.6.6.3 Escenario tendencial del cambio de cobertura y uso de suelo al año 2033.

Con base al análisis de los patrones la dinámica del cambio y los impulsores de cambio se proyectó el escenario futuro. Para su elaboración en la pestaña "Change Prediction" (predicción de cambio), específicamente en la sección "Change Demand Modeling" se digitó el año 2033 que corresponde al año de proyección y se obtuvo la matriz de probabilidad de cambios (ver Figura 54).

Given: Probability of changing to:

	AUR	CULT	BDS	HERA	HERD	ARTD	GLA	BDF	AGU
AUR	0.9990	0.0010	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
CULT	0.1376	0.7963	0.0850	0.0350	0.0000	0.0015	0.0000	0.0002	0.0000
BDS	0.0000	0.1230	0.8579	0.0000	0.0000	0.0191	0.0000	0.0000	0.0000
HERA	0.0000	0.0011	0.0103	0.9779	0.0000	0.0015	0.0000	0.0002	0.0002
HERD	0.0000	0.0003	0.0000	0.0052	0.9932	0.0012	0.0000	0.0005	0.0001
ARTD	0.0029	0.0059	0.0002	0.0024	0.0001	0.9875	0.0001	0.0000	0.0009
GLA	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.1395	0.8605	0.0000	0.0000
BDF	0.0001	0.0000	0.0003	0.0050	0.0451	0.0000	0.0000	0.9430	0.0065
AGU	0.0000	0.0624	0.0031	0.0014	0.0034	0.1539	0.0000	0.0000	0.7708

Figura 54. Matriz de probabilidad de cambio
Fuente. Elaboración propia.

Posteriormente en la sección “Change Allocation” (ver Figura 55) se dejó por defecto la configuración de los parámetros y se obtuvo el mapa tendencial proyectado y el mapa del potencial de transición al año 2033, donde las zonas cercanas al color rojo sugieren mayor probabilidad de cambio (ver Figura 56).

Figura 55. Parámetros de entrada para el escenario tendencial del año 2033
Fuente. Elaboración propia.

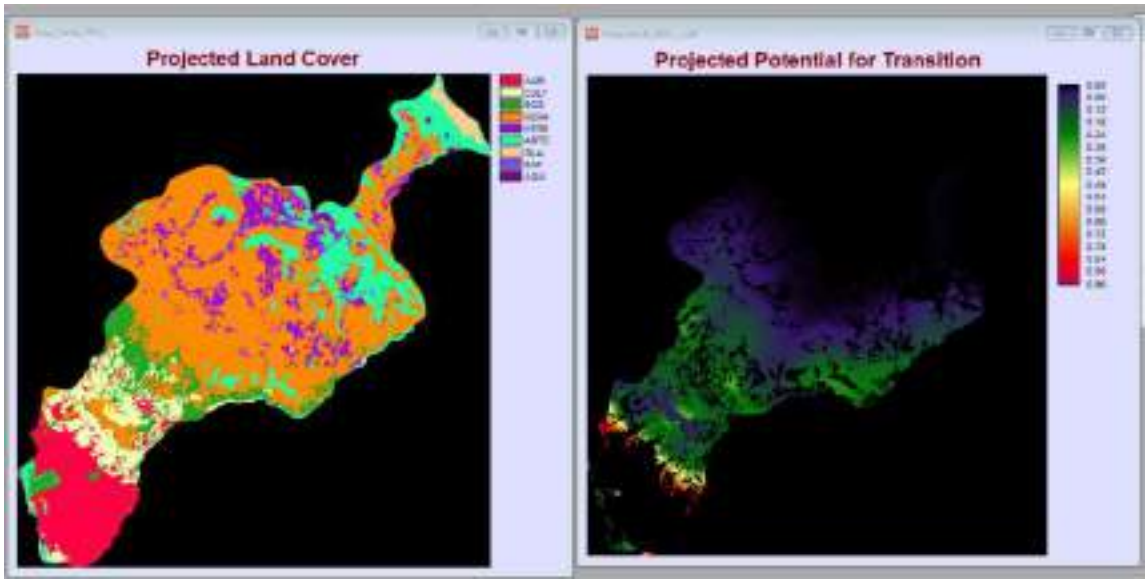


Figura 56. Escenario tendencial del cambio de cobertura y uso de suelo al año 2033
Fuente. Elaboración propia.

4.6.6.4 Escenarios restrictivos del cambio de cobertura y uso de suelo al año 2033.

Se proyectaron 2 escenarios restrictivos partiendo del supuesto donde existan ciertas restricciones en la dinámica del cambio de cobertura y uso de suelo dentro de las áreas con valor social, ambiental y/o histórico que se presentan en la Figura 58 y se detalla a continuación:

- Bosques de Queñuales: Área de bosque de Queñuales en el lugar turístico "Bosque Dorado" y que por su importancia ambiental debería conservarse. Se precisa que esta área no fue delimitada oficialmente en algún documento técnico por lo que su delimitación se realizó en base a lo observado en campo.
- Zonas con Valor Histórico Cultural Pre Hispánico: Ha sido delimitada en la Zonificación Ecológica y Económica (ZEE) de Junín y son áreas que tienen o han tenido usos ancestrales y/o culturales (Gobierno Regional de Junín, 2015c). Localmente se llama "Ruinas de Coto Coto" donde existen construcciones antiguas de piedra (ver Figura 57).
- Zona de Conservación Ecológica por importancia hídrica: Constituyen áreas que, por su característica geológica, topográfica y climatológica contribuyen a la recarga y mantenimiento de fuentes de agua superficial (Gobierno Regional de Junín, 2015c). Esta área ha sido delimitada en la ZEE de Junín y se ubica en la parte alta del distrito.
- Zona de Conservación Paisajística, zona de desarrollo forestal; y zona de reforestación y explotación de recursos no maderables: Áreas delimitadas en el Plan de Acondicionamiento Territorial de Huancayo 2037 (Municipalidad Provincial de Huancayo, 2017a). En esta área se ubica el lugar turístico conocido como Mirador de la Cruz de Paz y alrededores.
- Zonas de protección ecológica: Área delimitada en el Plan de Desarrollo Metropolitano de Huancayo 2017-2037, "son áreas que no pueden ser reemplazadas por habilitaciones urbanas" (Municipalidad Provincial de Huancayo, p. 146, 2017b). Esta área se ubica en la parte suroeste del distrito, cerca del límite con el distrito de San Agustín.

Figura 57. Zona con Valor Histórico Cultural Pre Hispánico
Fuente. Trabajo de campo (2024).

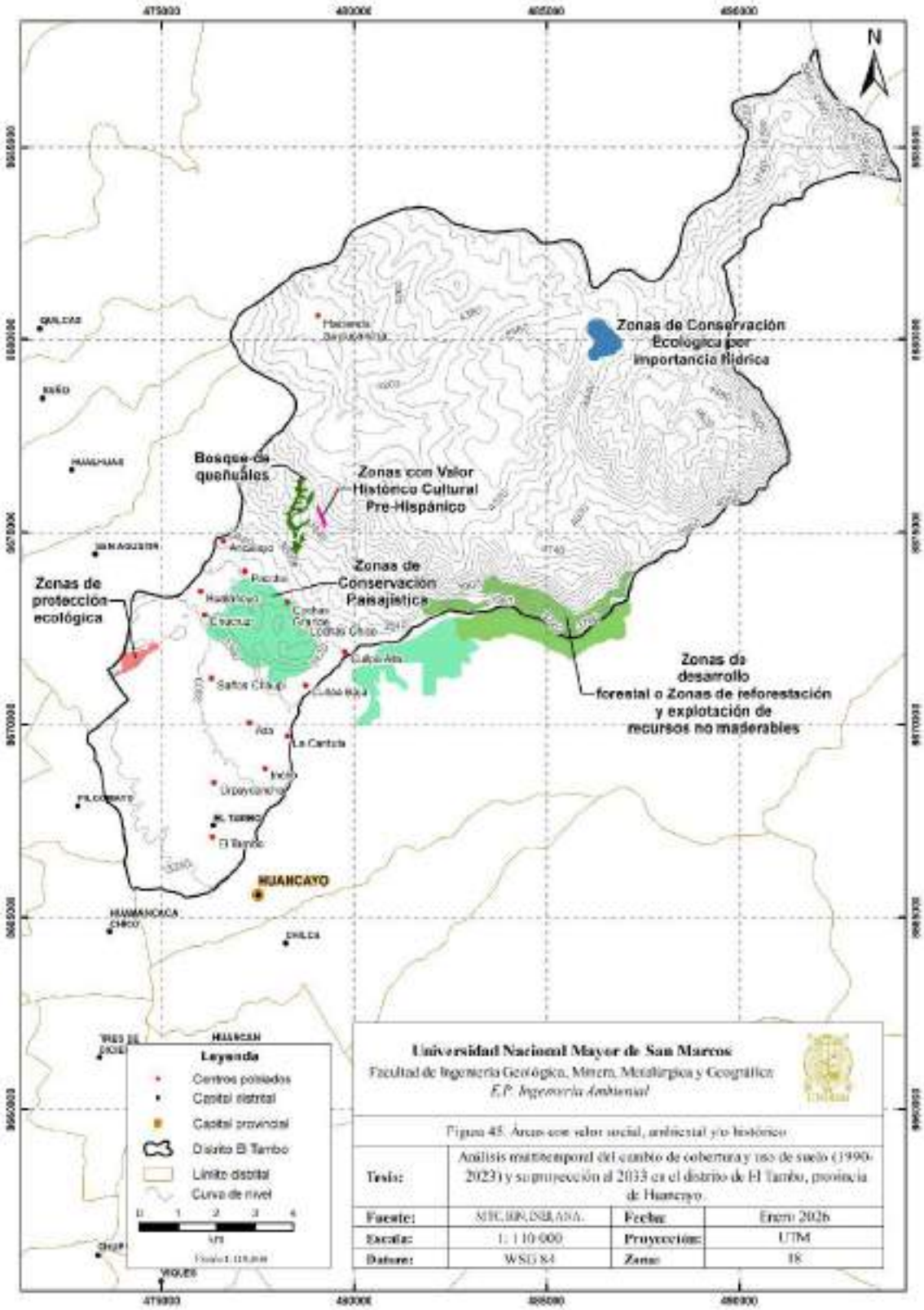


Figura 58. Áreas con valor social, ambiental y/o histórico
Fuente. Elaboración propia.

En la Tabla 35 se presentan las transiciones consideradas para la proyección de los escenarios restrictivos al 2033. Para el primero se parte del supuesto donde se prohíbe todo tipo de transición, mientras que en el segundo solo se permiten transiciones hacia bosque (BOS) o áreas agrícolas heterogéneas (CULT).

Tabla 35. Supuestos considerados en los escenarios restrictivos

Número	Transiciones	Descripción	Escenario restrictivo 1*	Escenario restrictivo 2**
1	CULT a AUR	Áreas agrícolas heterogéneas (CULT) a áreas urbanizadas (AUR)	No	No
2	HERA a BOS	Herbazal abierto (HERA) a bosque (BOS)	No	Sí
3	CULT a BOS	Áreas agrícolas heterogéneas (CULT) a bosque (BOS)	No	Sí
4	CULT a HERA	Áreas agrícolas heterogéneas (CULT) a herbazal abierto (HERA)	No	No
5	GLA a AR-TD	Glaciares (GLA) a afloramientos rocosos y tierras desnudas (AR-TD)	No	No
6	HERA a CULT	Herbazal abierto (HERA) a áreas agrícolas heterogéneas (CULT)	No	Sí

Fuente. Elaboración propia.
Nota: (*) Se restringe todo tipo de transición de la cobertura y uso de suelo dentro de las áreas restrictivas. (**) Se restringe solo la conversión hacia áreas urbanizadas o herbazal abierto dentro de las áreas restrictivas.

Se configuró en la pestaña “Planning” para que en las áreas restrictivas no se permita ningún tipo de cambio de cobertura y uso de suelo (ver Figura 59) y luego en la sección “Change Allocation” de la pestaña “Change Prediction” (Predicción de cambio) se activó la celda de “Zoning – Constraints / Incentives” (ver Figura 60). El primer escenario restrictivo y el potencial de transición se observan en la Figura 61. Se precisa que, en el mapa de potencial de transición, las áreas de colores rojo o más cercanos a este color, se interpretan como áreas con mayor potencial de transición al año 2033.

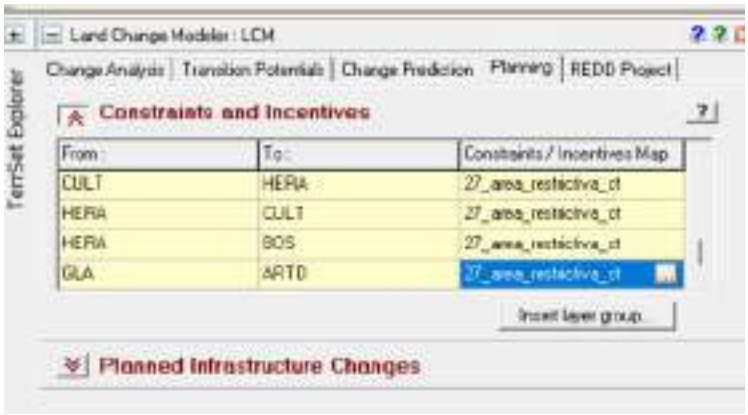


Figura 59. Configuración para la elaboración del primer mapa restrictivo
Fuente. Elaboración propia.

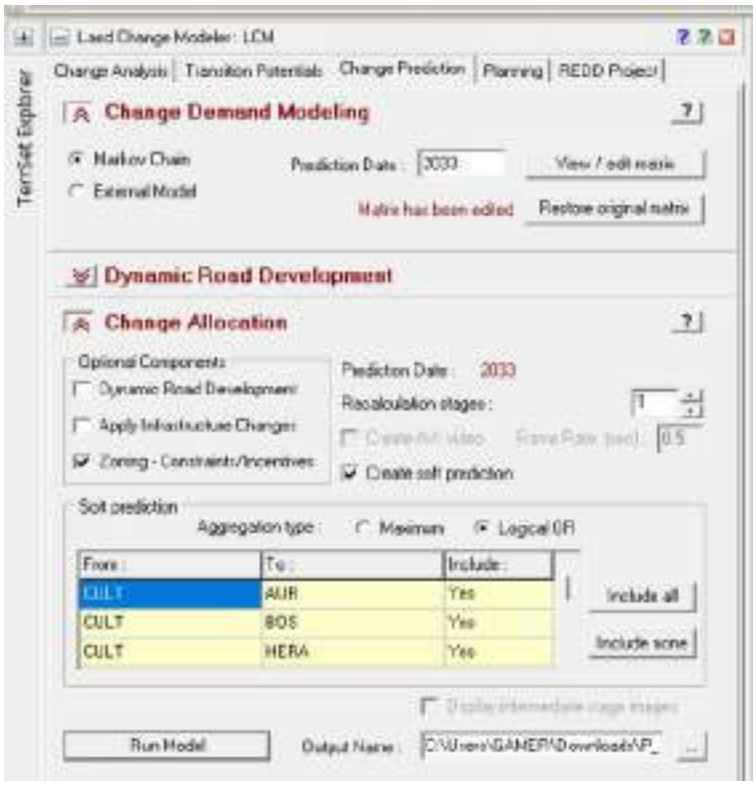


Figura 60. Proyección del primer mapa restrictivo
Fuente. Elaboración propia.

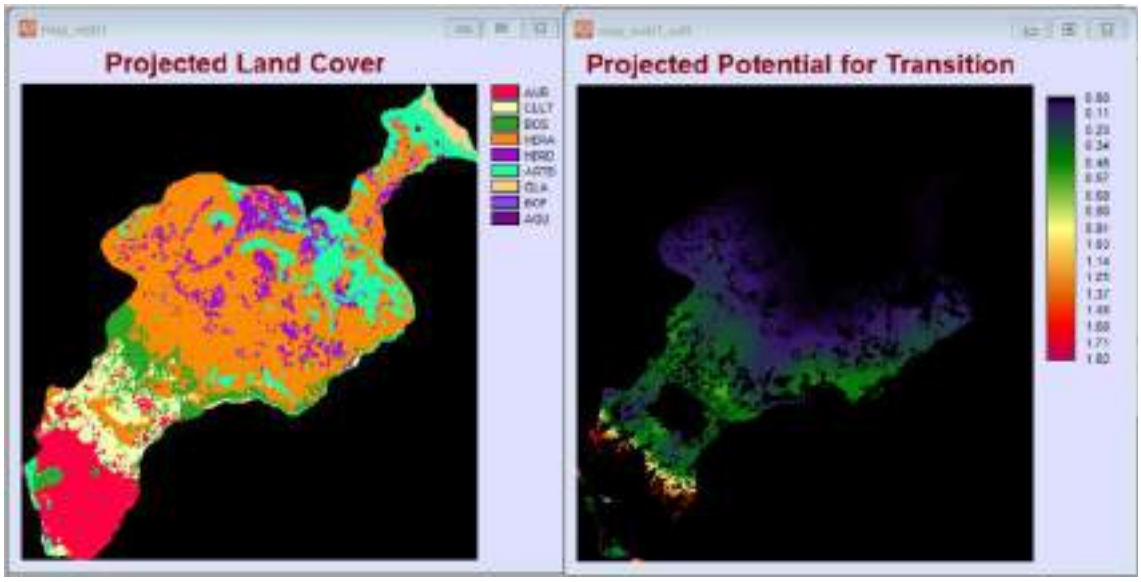


Figura 61. Primer escenario restrictivo del cambio de cobertura y uso de suelo al año 2033
Fuente. Elaboración propia.
Nota: Imagen izquierda: Cobertura y uso del suelo proyectado al 2033. Imagen derecha: Potencial de transición proyectada, los colores más cercanos al rojo indican que tiene mayor probabilidad para cambiar.

Para el segundo escenario restrictivo, en la pestaña "Planning" se configuró para que en las áreas restrictivas no se presente ningún tipo de cambio de cobertura y uso de suelo hacia Áreas urbanizadas (AUR) y Herbazal abierto (HERA). La configuración de parámetros se observa en la Figura 62; y el resultado del escenario proyectado y el mapa de potencial de transición está en la Figura 63.

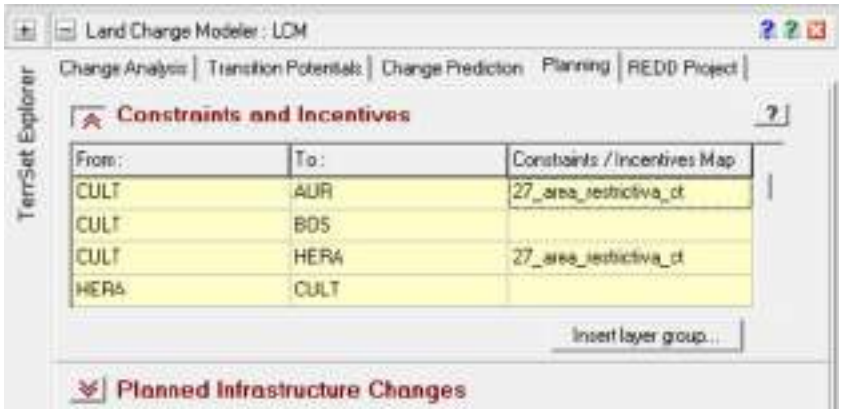


Figura 62. Configuración para la elaboración del segundo mapa restrictivo
Fuente. Elaboración propia.

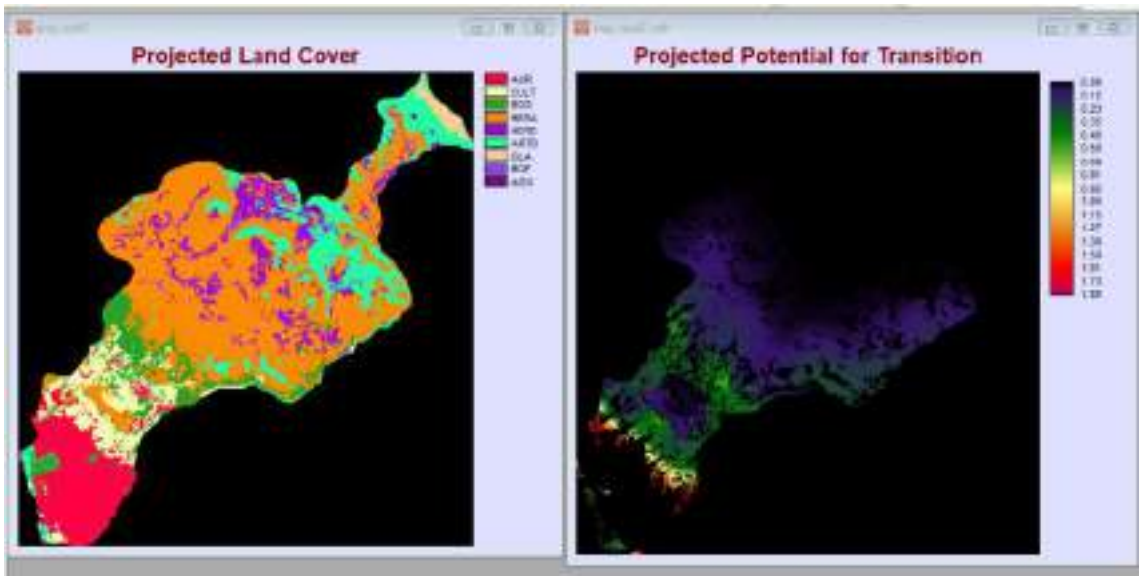


Figura 63. Segundo mapa restrictivo del cambio de cobertura y uso de suelo al año 2033
*Fuente***.** Elaboración propia.
Nota: Imagen izquierda: Cobertura y uso de suelo proyectado al 2033. Imagen derecha: Potencial de transición proyectada, los colores más cercanos al rojo indican que tiene mayor potencial para cambiar.

4.6.6.5 Validación del modelo.

De acuerdo con la metodología usada en investigaciones similares, se realizó la proyección de la cobertura y uso de suelo del año 2023 usando los años 2003 y 2013; y se realizó el análisis de validación usando el programa Map Comparison Kit 3. Se precisa que el procedimiento de validación es igual a lo realizado para la proyección de escenarios al año 2033.

Se cargaron los archivos de los años 2003, 2013 y el modelo digital de elevación - DEM Alos en el módulo Land Change Modeler (LCM) (ver Figura 64), luego se generó el mapa de transiciones (ver Figura 65); y para generar los mapas de potencial de transición se agruparon 6 transiciones en el modelo “MOD1” (ver Tabla 32 y Figura 66).

Figura 64. Archivos de entrada para el módulo Land Change Modeler (LCM) – validación
Fuente. Elaboración propia.

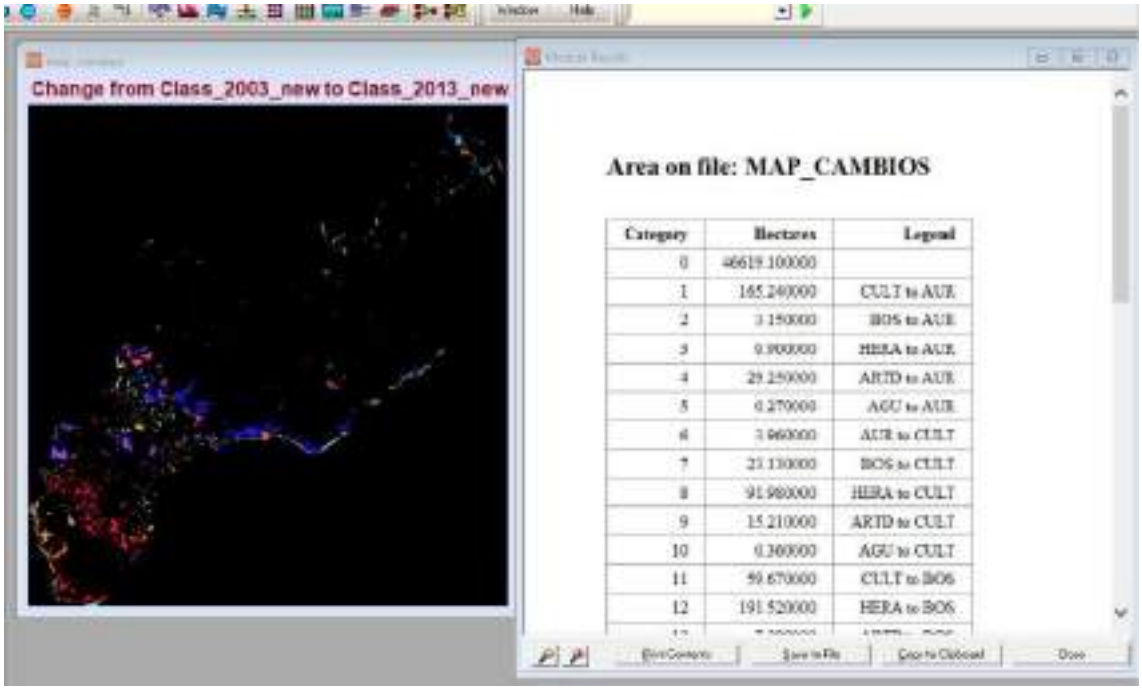


Figura 65. Mapa de transiciones de cobertura y uso de suelo para el periodo 2003-2013 – validación
Fuente. Elaboración propia.

Figura 66. Transiciones elegidas para el submodelo de transición – validación
Fuente. Elaboración propia.

Se evaluaron casi todas las variables que se presentaron en la Tabla 33, excepto las habilitaciones urbanas ya que estos proyectos no fueron aprobados en el periodo 2003-2013. En la Tabla 36 se presentan los valores V Cramer de las variables elegidas para la proyección al 2023. Se precisa que solo la distancia a vías secundarias se modificó según lo observado en las imágenes de Google Earth para el periodo 2003-2013.

Tabla 36. Variables elegidas para el escenario de validación del 2023

Número	Variables	Resultados V Cramer
1	Modelo Digital de Elevación (DEM)	0.4527
2	Distancia a vías principales	0.2829
3	Distancia a vías secundarias*	0.3882
4	Distancia a red hídrica	0.1914
5	Distancia a centros poblados considerados en el INEI	0.4229
6	Distancia a fuentes de agua	0.4085
7	Distancia a derechos de uso de agua - uso agrario	0.4512
8	Distancia a derechos de uso de agua - uso poblacional	0.4235

Fuente. Elaboración propia.
Nota: (*) Los accesos existentes se modificaron según lo observado en las imágenes de Google Earth para el periodo 2003-2013.

Se realizaron diferentes ensayos hasta obtener valores de un modelo aceptable, se obtuvo una tasa de exactitud de 83.53 %, valor de entrenamiento de 0.1673 y valor de testeo de 0.1698 (ver Figura 67).

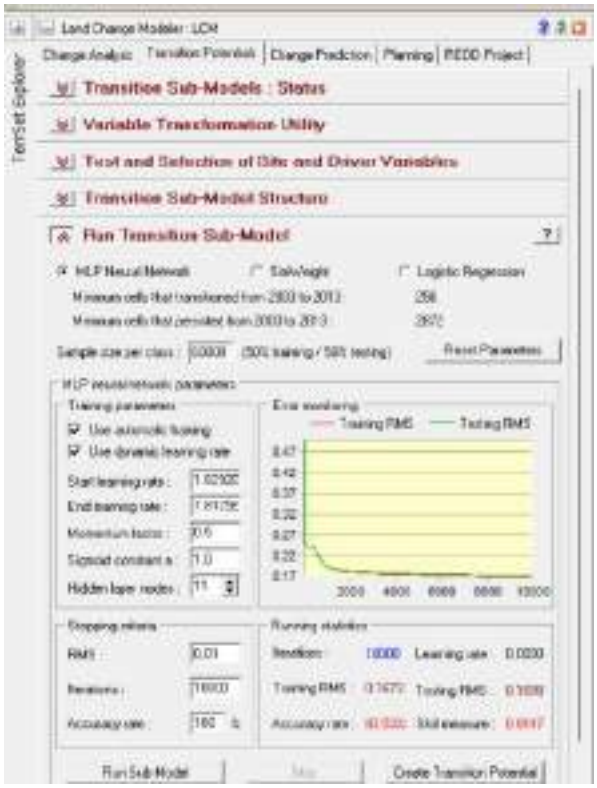


Figura 67. Valores de configuración para el submodelo de transición - validación
Fuente. Elaboración propia.

Posteriormente, se generaron los mapas de potencial de transición, la matriz de probabilidad de cambio y se obtuvo el mapa proyectado del año 2023 (ver Figura 68).

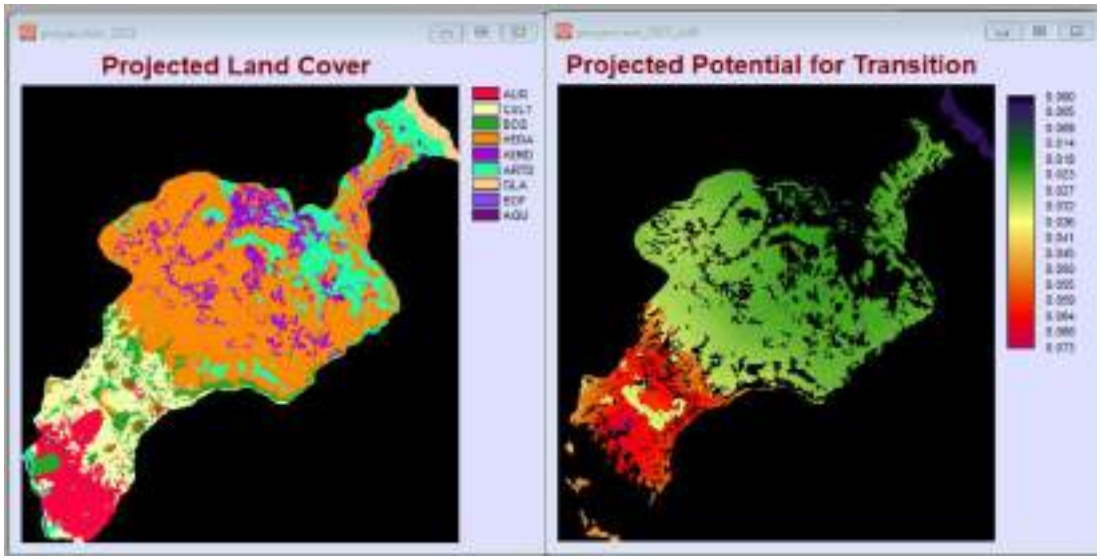


Figura 68. Mapa proyectado de la cobertura y uso de suelo del año 2023
Fuente. Elaboración propia.

Finalmente, en el programa Map Comparison Kit 3 se cargó el mapa proyectado del año 2023 y el mapa de la clasificación supervisada del año 2023. Tal como se observa en la Figura 69, se obtuvo un valor de Kappa de 0.849 y K location de 0.880, lo cual sustenta la validez del modelo de proyección.

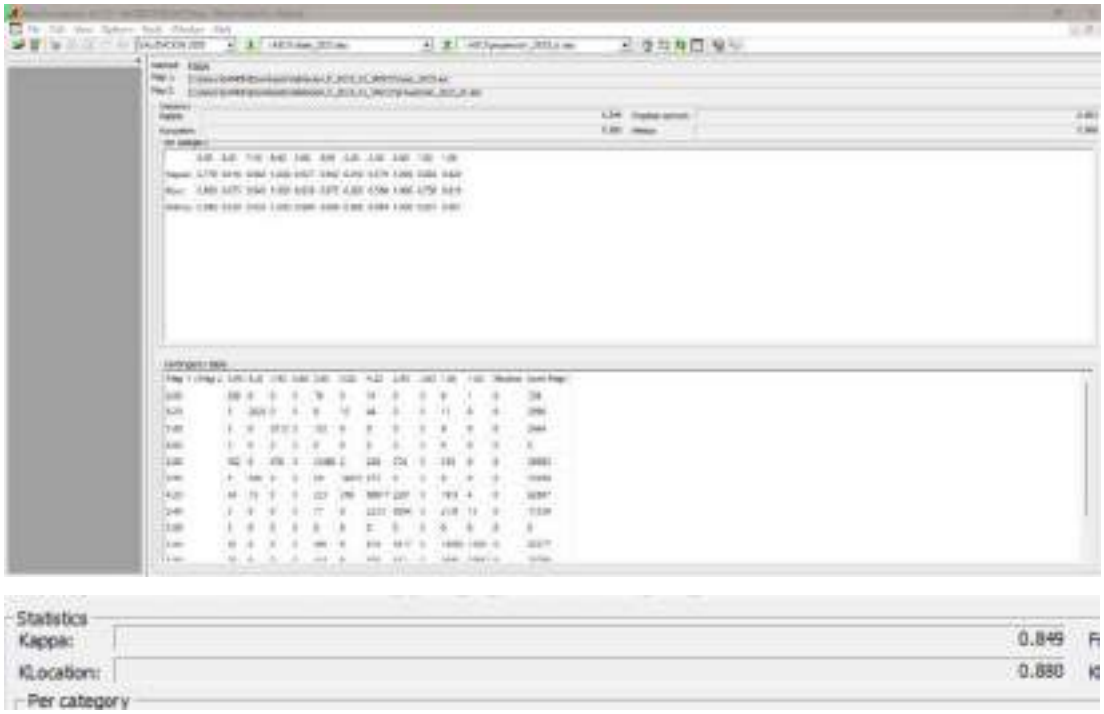


Figura 69. Validación del modelo de proyección del año 2023 usando el programa Map Comparison Kit 3
Fuente. Elaboración propia.

CAPÍTULO 5: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 Objetivo N°1: Categorías de cobertura y uso de suelo para el periodo 1990-2023 aplicando la leyenda Corine Land Cover adaptada para Perú

5.1.1 Categorías de cobertura y uso de suelo identificadas en el distrito de El Tambo

Se definieron 9 categorías según la leyenda Corine Land Cover: áreas urbanizadas (AUR); áreas agrícolas heterogéneas (CULT); herbazal abierto (HERA); herbazal denso (HERD); afloramientos rocosos y tierras desnudas (AR-TD); glaciares (GLA); turberas y bofedales; y cuerpos de agua (AGU) (ver Tabla 37). El uso de los índices NDVI, BSI; combinaciones RGB (ver Anexo 2), imágenes de Google Earth, imagen CBER (solo para el 2023) y Google Maps sirvieron para la identificación y delimitación de las categorías de difícil acceso como las turberas y bofedales; y glaciar.

Tabla 37. Cobertura y uso de suelo en el distrito de El Tambo según la leyenda Corine Land Cover

Categorías Corine Land Cover identificadas en el distrito			
Nivel I	**Nivel II**	**Nivel III**	**Nivel IV**
Áreas artificializadas	Áreas urbanizadas (AUR)		
Áreas agrícolas	Áreas agrícolas heterogéneas (CULT)		
Bosques y áreas mayormente naturales	Bosque (BOS)		
	Áreas con vegetación herbácea y/o arbustivo	Herbazal	Herbazal abierto (HERA)) Herbazal denso (HERD
	Áreas sin o con poca vegetación	Afloramientos rocosos y tierras desnudas (AR-TD)	
		Glaciares (GLA)	

Categorías Corine Land Cover identificadas en el distrito			
Nivel I	**Nivel II**	**Nivel III**	**Nivel IV**
Áreas	Áreas húmedas continentales	Turberas y bofedales (BOF)	
		Cuerpos de agua (lagos, lagunas y ríos) (AGU)	

Fuente. Elaboración propia.
Nota: La leyenda Corine Land Cover no considera códigos para referirse a cada categoría, por ello para fines prácticos en esta investigación se definieron términos cortos que agilicen la identificación de cada categoría.

5.1.1.1 Áreas urbanizadas – AUR.

Son áreas donde predominan construcciones como las viviendas y espacios públicos de recreación (parques, canchas deportivas, entre otros). Esta categoría según la leyenda Corine Land Cover, se subdivide en tejido urbano continuo y discontinuo. En el primer caso, casi la totalidad está ocupada por infraestructuras urbanas, las viviendas tienen más de un piso, son de material noble y las vías están asfaltadas. En el segundo caso, las casas están más separadas entre sí, existe vegetación natural colindante y son de material rústico (calamina, adobe, pisos de tierra, entre otros). Se precisa que la imagen satelital Landsat no permite la diferenciación de estas dos subcategorías a nivel espacial, por lo que solo se realizó a nivel descriptivo.

Según lo observado en campo, los centros poblados Ancalayo, Paccha, Hualahoyo, Chucruz, Saños Chaupi, Paccha y Aza son áreas urbanizadas discontinuas (ver Figura 70), mientras que los centros poblados de El Tambo, Cochas Grande, Cullpa Alta, Cullpa Baja, La Cantuta, Incho y Urpaycancha serían áreas urbanizadas continuas (ver Figura 71). En el centro poblado Cochas Grande se ubica el Parque de los Mates Burilados considerado como atractivo turístico (ver Figura 72).

Figura 70. Centros poblados de Ancalayo y Paccha
Nota: A la izquierda, vista del centro poblado de Ancalayo. A la derecha, centro poblado de Paccha.
Fuente: Elaboración propia (2024).

Figura 71. Casco urbano del distrito de El Tambo
Nota: Fotografía tomada desde el mirador Cruz de Paz ubicado en el centro poblado Cochas Chico.
Fuente. Elaboración propia (2024).

Figura 72. Centro poblado Cochas Chico
Fuente: Elaboración propia (2024).
Nota: Vista del Parque de los Mates Burilados.

5.1.1.2 Áreas agrícolas heterogéneas – CULT.

Según el MINAM (2015) "Son unidades que se reúnen dos o más categorías de cobertura agrícolas y naturales. Están dispuestas en un patrón intrincado de mosaicos geométricos que hace difícil su separación en coberturas individuales" (p. 49).

Se identificaron principalmente cultivos de papa, habas, cebada y maíz amarillo (ver Figura 73). Además, en algunas parcelas se observó forraje que sirve de alimento del ganado vacuno, ovino y/o animales menores. En los meses en los que se realizó la visita a campo coincidió con la época seca y con la temporada de cosecha de los cultivos. Se observó que esta cobertura no es homogénea ya que las parcelas se encuentran delimitadas principalmente por plantaciones de eucaliptos.

Figura 73. Áreas agrícolas heterogéneas – CULT
Nota: Foto superior, se observa cultivo de habas. Foto inferior, se observa el cultivo de maíz.
Fuente. Elaboración propia (2024).

5.1.1.3 Bosque – BOS.

El MINAM (2014) define como bosque aquella vegetación que tiene:

> Altura mayor a 5m. Cobertura mayor al 10 %. Umbral entre denso y abierto: 70 % de cobertura. Los bosques riparios y otros ecológicamente discernibles entrarían como nivel 4. Se consideran excepciones importantes

definidas por restricciones bioclímicas y biogeográficas (particularmente en Perú y Bolivia), como los bosques de Polylepis o Prosopis. (p.49)

Esta categoría, también incluye bosques plantados que es la vegetación arbórea que resulta de procesos de las plantaciones forestales con fines de aprovechamiento económico o ambiental (MINAM, 2014).

Según lo observado en campo la mayor parte de los bosques está conformada por eucaliptos y pinos. Además, se identificaron plantaciones recientes solo de esos árboles en zonas consideradas como atractivos turísticos (ver Figura 76**)**. En el lugar conocido como "Bosque 7 leyendas" predominan los árboles de eucalipto (ver Figura 74), en el "Bosque dorado" predominan Queñuales (ver Figura 75) y en el "Bosque de los Pinos" se observan plantaciones de pino. En el Anexo 3 se presentan las fichas de identificación de esta categoría.

Se precisa que, existe una distribución restringida de árboles nativos como los Queñuales y Aliso, por ejemplo, los primeros se encuentran principalmente en el lugar turístico llamado "Bosque Dorado".

Figura 74. Plantaciones de eucalipto
Nota: Plantaciones de eucalipto en el lugar turístico "Parque de las 7 Leyendas"
Fuente. Elaboración propia (2024).

Figura 75. Plantaciones de pino
Nota: Plantaciones forestales de pino en el lugar turístico “Bosque Dorado”.
Fuente. Elaboración propia (2024).

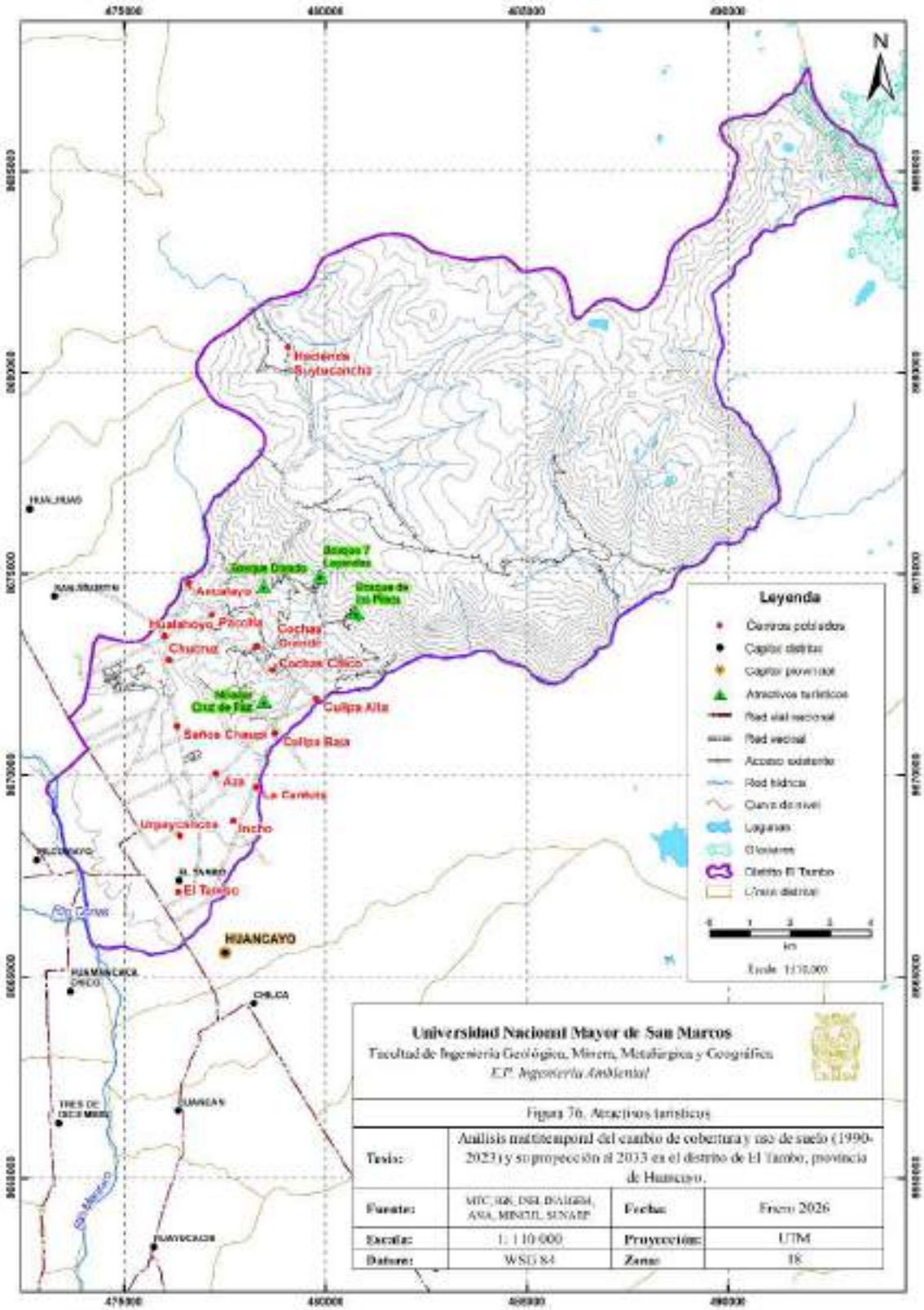


Figura 76. Atractivos turísticos
Fuente. Elaboración propia

5.1.1.4 Herbazal.

Se definen como áreas donde predomina la vegetación herbácea de origen natural en diferentes densidades y sustratos (Arnillas *et al.,* 2012). Además, según el MINAM (2015) se ubican en la cordillera de los Andes, en altitudes mayores a 3 800 m s. n. m. y en terrenos con pendientes variables. Según sus características florísticas y fisionómicas se clasifican en tolar que son plantas que alcanzan una altitud de hasta 1.20 m, pajonales que son plantas que pueden llegar a medir 80 cm de alto y césped que llega a una altura de 15 cm.

En el distrito se identificó al herbazal denso (HERD) conformado principalmente por vegetación tipo césped; y herbazal abierto (HERA) conformado por pajonales y tolares. Además, en esta categoría se ubican aproximadamente 33 lugares entre estancias y corrales donde se desarrolla la actividad ganadera.

- Herbazal denso - HERD

Áreas donde hay vegetación tipo césped (ver Figura 77 y Figura 78). En el Anexo 3 se muestra la ficha donde se presenta más información de esta categoría.

Figura 77. Herbazal denso - HERD
Fuente. De Ricky P. (2021). Imagen tomada de Google Maps. https://www.google.com/maps/@-11.9684764,75.1700216,3a,44.5y,60.83h,80.35t/data=!3m8!1e1!3m6!1sAF1QipNY0bemm0XfBofSVZndRFfiaCz0PDfnEw6tiM-C!2e10!3e11!6shttps:%2F%2Flh3.googleusercontent.com%2Fp%2FAF1QipNY0bemm0XfBofSVZndRFfiaCz0PDfnEw6tiM-C%3Dw900-h600-knopi9.653101638188176ya63.82509666367844ro0fo100!7i9216!8i3886?authuser=0&entry=ttu&g_ep=EgoyMDI1MDIyNi4xIKXMDSoASAFQAw%3D%3D

Figura 78. Herbazal denso - HERD
Nota: Foto izquierda: orientación este, foto derecha: orientación norte
Fuente. Iván Perez E. (2020). Imagen tomada de Google Maps. https://www.google.com/maps/@-11.927934,-75.1995194,3a,75y,317.83h,73.45t/data=!3m8!1e1!3m6!1sAF1QipMROjZTDuEYmTRE-Z-xYD5mAGncayJ_bRrYZPqE!2e10!3e11!6shttps:%2F%2Flh3.googleusercontent.com%2Fp%2FAF1QipMROjZTDuEYmTRE-Z-xYD5mAGncayJ_bRrYZPqE%3Dw900-h600-k-no-pi16.554961858991163-ya200.82799878085893-ro0-fo100!7i10752!8i4766?authuser=0&entry=ttu&g_ep=EgoyMDI1MDIyNS4wIKXMDSoASAFQAw%3D%3D

- Herbazal abierto - HERA

Se extiende en diferentes zonas del distrito y en altitudes variables, hay predominancia de Ichu y arbustos dispersos (ver Figura 79 y ver Anexo 3). Estas áreas a veces son quemadas para su conversión a otro tipo de vegetación que pueda consumir el ganado.

Figura 79. Herbazal abierto - HERA
Fuente. Elaboración propia (2024).
Nota: En la imagen inferior se observa un área quemada.

5.1.1.5 Afloramientos rocosos y tierras desnudas - AR-TD.

Áreas donde hay rocas expuestas que no permiten el desarrollo de vegetación en su totalidad. En esta categoría también se consideran las zonas con poca o nula vegetación generados por procesos naturales (cárcavas, zonas de deslizamientos y erosión) o por actividad antrópica. En el Anexo 3 se presentan las fichas de los puntos tomados en campo.

5.1.1.6 Glaciares - GLA.

Corresponde a la zona glaciar que se ubica en el Área de Conservación Regional Nevado de Huaytapallana que se ubica al noreste del distrito de El Tambo (ver Figura 80).

Figura 80. Glaciar – GLA
Nota: Vista hacia el noreste, se observa el Nevado Huaytapallana y la laguna Lazo Huntay.
Fuente. Rene Esteban (2022). Imagen tomada de Google Maps. https://www.google.com/maps/@-11.9251599,-75.0614158,3a,75y,32.31h,91.76t/data=!3m8!1e1!3m6!1sAF1QipPvytkQaygKI4r77T-nBSGCUGdeAM571vtghYqv!2e10!3e11!6shttps:%2F%2Flh3.googleusercontent.com%2Fp%2FAF1QipPvytkQaygKI4r77T-nBSGCUGdeAM571vtghYqv%3Dw900-h600-k-no-pi-1.7639658765430823-ya274.31299220648333-ro0-fo100!7i6144!8i3072?authuser=0&entry=ttu&g_ep=EgoyMDI1MDIyNS4wIKXMDSoASAFQAw%3D%3D

5.1.1.7 Turberas y bofedales -BOF.

Según el MINAM (2015) “el bofedal llamado también “oconal” o “turbera” […] constituye un ecosistema hidromórfico constituido en la región altoandina, a partir de los 3 800 m s. n. m., principalmente en las zonas sur y central del país” (p. 77). En el distrito, los bofedales se ubicaron en la parte alta y se delimitaron en base a la información bibliográfica, cartográfica disponible, combinación de bandas RGB, imagen CBER del año 2023 y lo observado en campo (ver Anexo 3).

5.1.1.8 Cuerpos de agua (lagos, lagunas y ríos) – AGU.

En el distrito hay lagos y lagunas que se ubican en la parte alta, siendo los más representativos Ancapuachanan y Chuspicocha que están cerca del nevado Huaytapallana. Por otro lado, el Río Mantaro (ver Figura 81) y el río Shullcas son los ríos principales. Se precisa que no fue posible delimitar el río Shullcas usando las imágenes Landsat ya que el cauce no es lo suficientemente amplio para ser detectado por la resolución espacial de la imagen.

Figura 81. Cuerpos de agua - AGU
Nota: Fotografía tomada en el Puente Comuneros donde se observa el recorrido del Río Mantaro.
Fuente. Elaboración propia (2024).

5.1.2 Evaluación de la exactitud temática: Matriz de confusión, Índice de Kappa e Índice QADI

En base a la matriz de confusión se calculó el índice de Kappa e índice QADI de la clasificación supervisada de los años 1990, 2003, 2013 y 2023. En la matriz de confusión (ver Tabla 38) los valores de la diagonal indican píxeles correctamente clasificados, los valores por encima de la diagonal indican valores de sobreestimación y los valores por debajo de la diagonal indican una subestimación.

Para el año 2023 el índice de Kappa fue de 0.86, la precisión global fue de 87.72 % y el índice QADI fue de 0.11 (ver Tabla 38 y Figura 82). Estos resultados indican una concordancia casi perfecta; y una alta confianza y un bajo desacuerdo. Respecto a la exactitud del usuario, los glaciares (GLA), áreas urbanizadas (AUR) y herbazal abierto (HERA) tuvieron valores superiores a 93.94 %. Mientras que las áreas agrícolas heterogéneas (CULT); y turberas y bofedales (BOF) presentaron el 78.80 % y 71.30 % respectivamente. En relación con la exactitud del productor, los cuerpos de agua (AGU) tuvieron el valor más bajo (55.88 %).

Tabla 38. Matriz de confusión del año 2023

Categorías	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Total píxeles	Exactitud del usuario (%)	Error de comisión (%)
1_AUR	549	3	1	1	0	11	0	0	3	568	96.65	3.35
2_CULT	8	498	20	54	41	1	0	9	1	632	78.80	21.20
3_BOS	0	5	430	1	0	15	3	8	31	493	87.22	12.78
4_HERA	0	7	0	527	1	25	0	0	1	561	93.94	6.06
5_HERD	0	9	1	26	429	4	0	12	0	481	89.19	10.81
6_AR-TD	22	16	0	1	0	337	1	0	13	390	86.41	13.59
7_GLA	1	0	0	0	0	0	350	0	10	361	96.95	3.05
8_BOF	0	9	26	4	57	0	0	241	1	338	71.30	28.70
9_AGU	0	0	0	0	0	0	18	0	76	94	80.85	19.15
Total píxeles	580	547	478	614	528	393	372	270	136	3918		
Exactitud del productor (%)	94.66	91.04	89.96	85.83	81.25	85.75	94.09	89.26	55.88		**Precisión global: 87.72%**	
Error de omisión (%)	5.34	8.96	10.04	14.17	18.75	14.25	5.91	10.74	44.12			

Fuente. Elaboración propia.
Nota: 1: AUR, 2: CULT, 3: BOS, 4: HERA, 5: HERD, 6:AR-TD, 7: GLA, 8: BOF y 9: AGU

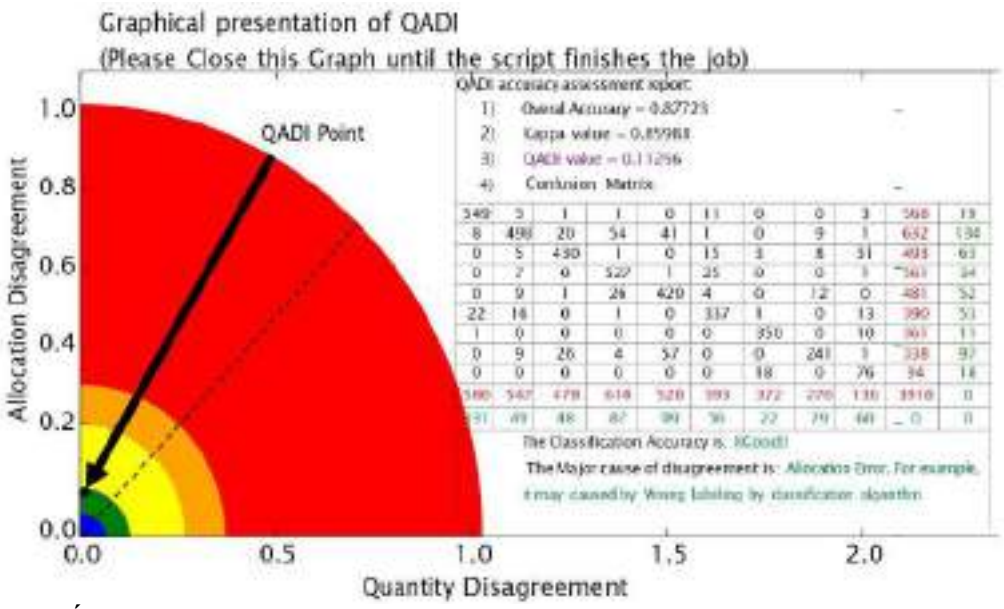


Figura 82. Índice QADI del año 2023
Fuente. Elaboración propia.

Para el año 2013 el valor del índice de Kappa fue de 0.86, la precisión global fue de 87.96 % y el índice de QADI fue de 0.12. Estos resultados indican una concordancia casi perfecta; y una alta confianza y un bajo desacuerdo (ver Tabla 39 y Figura 83).

Según la matriz de confusión (ver Tabla 39) las categorías que presentaron los valores más altos de exactitud del usuario fueron las mismas que en el año 2023: glaciares (GLA), áreas urbanizadas (AUR), herbazal abierto (HERA) con valores de 100.00 %, 96.83 % y 96.31 % respectivamente; a diferencia de las turberas y bofedales (BOF) que tuvo el menor resultado (67.54 %).

Tabla 39. Matriz de confusión del año 2013

Categorías	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Total píxeles	Exactitud del usuario (%)	Error de comisión (%)
1_AUR	550	3	0	0	11	4	0	0	0	568	96.83	3.17
2_CULT	7	475	17	50	69	4	0	4	0	626	75.88	24.12
3_BOS	0	6	404	1	0	5	1	4	6	427	94.61	5.39
4_HERA	0	7	0	522	0	13	0	0	0	542	96.31	3.69
5_HERD	0	22	0	19	409	7	0	4	0	461	88.72	11.28
6_AR-TD	27	8	1	5	12	359	0	0	10	422	85.07	14.93
7_GLA	0	0	0	0	0	0	348	0	0	348	100.00	0.00
8_BOF	0	19	53	23	27	1	0	258	1	382	67.54	32.46

9_AGU	0	0	0	0	0	0	21	0	122	143	85.31	14.69
Total píxeles	584	540	475	620	528	393	370	270	139	3919		
Exactitud del productor (%)	94.18	87.96	85.05	84.19	77.46	91.35	94.05	95.56	87.77	**Precisión global: 87.96 %**		
Error de omisión (%)	5.82	12.04	14.95	15.81	22.54	8.65	5.95	4.44	12.23			

Fuente: Elaboración propia.
Nota: 1: AUR, 2: CULT, 3: BOS, 4: HERA, 5: HERD, 6:AR-TD, 7: GLA, 8: BOF y 9: AGU

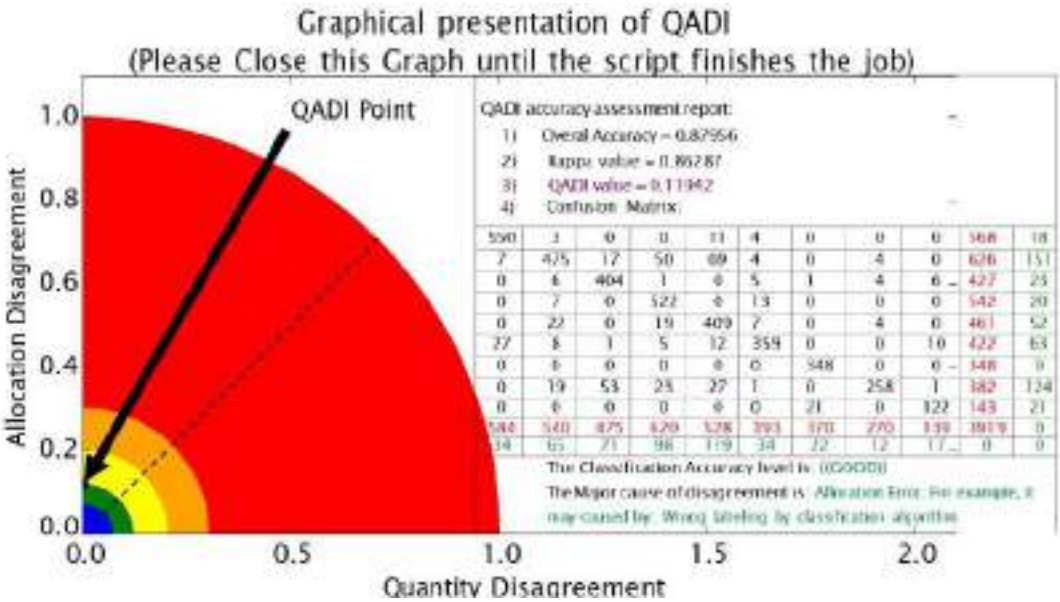


Figura 83. Índice QADI del año 2013
Fuente. Elaboración propia.

Para el año 2003 el valor del índice de Kappa fue de 0.87, la precisión global fue de 88.23 % y el índice de QADI fue de 0.11. Estos valores indican una concordancia casi perfecta; y una alta confianza y bajo desacuerdo (ver Figura 84).

Según la matriz de confusión (ver Tabla 40) las categorías con los valores más altos de exactitud del usuario fueron: glaciares (GLA); áreas urbanizadas (AUR); turberas y bofedales (BOF) con valores de 100.00 %, 97.19 % y 91.73 % respectivamente. Mientras que las áreas agrícolas heterogéneas (CULT) tuvieron el valor más bajo (76.40 %). Respecto a la exactitud del productor, los cuerpos de agua (AGU) tuvieron el valor más bajo (77.78 %).

Tabla 40. Matriz de confusión del año 2003

Categorías	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Total píxeles	Exactitud del usuario (%)	Error de comisión (%)
1_AUR	519	2	0	0	0	13	0	0	0	534	97.19	2.81
2_CULT	33	479	33	51	10	9	0	12	0	627	76.40	23.60
3_BOS	0	1	397	25	6	4	0	0	3	436	91.06	8.94
4_HERA	0	21	4	529	15	21	0	0	8	598	88.46	11.54
5_HERD	0	12	8	31	487	6	0	25	0	569	85.59	14.41
6_AR-TD	31	9	0	4	0	333	1	0	21	399	83.46	16.54
7_GLA	0	0	0	0	0	0	358	0	0	358	100.00	0.00
8_BOF	0	0	11	0	10	0	0	233	0	254	91.73	8.27
9_AGU	0	0	0	0	0	8	12	0	112	132	84.85	15.15
Total píxeles	583	524	453	640	528	394	371	270	144	3907		
Exactitud del productor (%)	89.02	91.41	87.64	82.66	92.23	84.52	96.50	86.30	77.78		**Precisión global: 88.23%**	
Error de omisión (%)	10.98	8.59	12.36	17.34	7.77	15.48	3.50	13.70	22.22			

Fuente. Elaboración propia.
Nota: 1: AUR, 2: CULT, 3: BOS, 4: HERA, 5: HERD, 6:AR-TD, 7: GLA, 8: BOF y 9: AGU

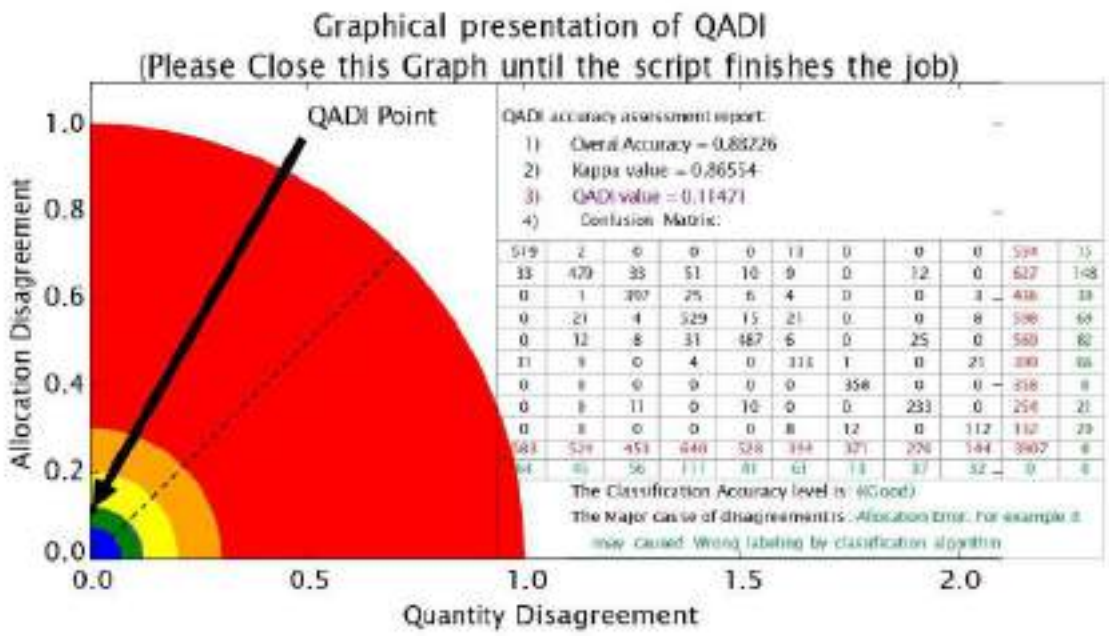


Figura 84. Índice QADI del año 2003
Fuente. Elaboración propia.

Para el año 1990 el valor del índice de Kappa fue de 0.85, la precisión global fue de 86.58 % y el índice de QADI fue de 0.13. Estos resultados se interpretan como una

clasificación casi perfecta; y un nivel de confianza y desacuerdo moderado (ver Figura 85).

Según la matriz de confusión obtenida (ver Tabla 41) las categorías con los valores más altos de exactitud del usuario fueron: glaciares (GLA), bosque (BOS) y áreas urbanizadas (AUR) con valores de 100.00 %, 97.02 % y 93.62 % respectivamente. Mientras que las áreas agrícolas heterogéneas (CULT) tuvieron el menor porcentaje (73.67 %). Respecto a la exactitud del productor, las turberas y bofedales (BOF) tuvieron el valor más bajo (75.56 %).

Tabla 41. Matriz de confusión del año 1990

Categorías	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Total Píxeles	Exactitud del usuario (%)	Error de comisión (%)
1_AUR	543	21	0	0	0	16	0	0	0	580	93.62	6.38
2_CULT	40	456	29	37	23	11	0	23	0	619	73.67	26.33
3_BOS	0	8	423	1	0	0	0	0	4	436	97.02	2.98
4_HERA	0	24	2	531	6	22	0	0	9	594	89.39	10.61
5_HERD	0	3	4	62	469	26	0	43	6	613	76.51	23.49
6_AR-TD	8	14	0	10	0	311	0	0	15	358	86.87	13.13
7_GLA	0	0	0	0	0	0	357	0	0	357	100.00	0.00
8_BOF	0	0	3	0	32	0	0	204	1	240	85.00	15.00
9_AGU	0	0	0	0	0	9	16	0	112	137	81.75	18.25
Total píxeles	591	526	461	641	530	395	373	270	147	3934		
Exactitud del productor (%)	91.88	86.69	91.76	82.84	88.49	78.73	95.71	75.56	76.19	**Precisión global: 86.58%**		
Error de omisión (%)	8.12	13.31	8.24	17.16	11.51	21.27	4.29	24.44	23.81			

Fuente. Elaboración propia.

Nota: 1: AUR, 2: CULT, 3: BOS, 4: HERA, 5: HERD, 6:AR-TD, 7: GLA, 8: BOF y 9: AGU

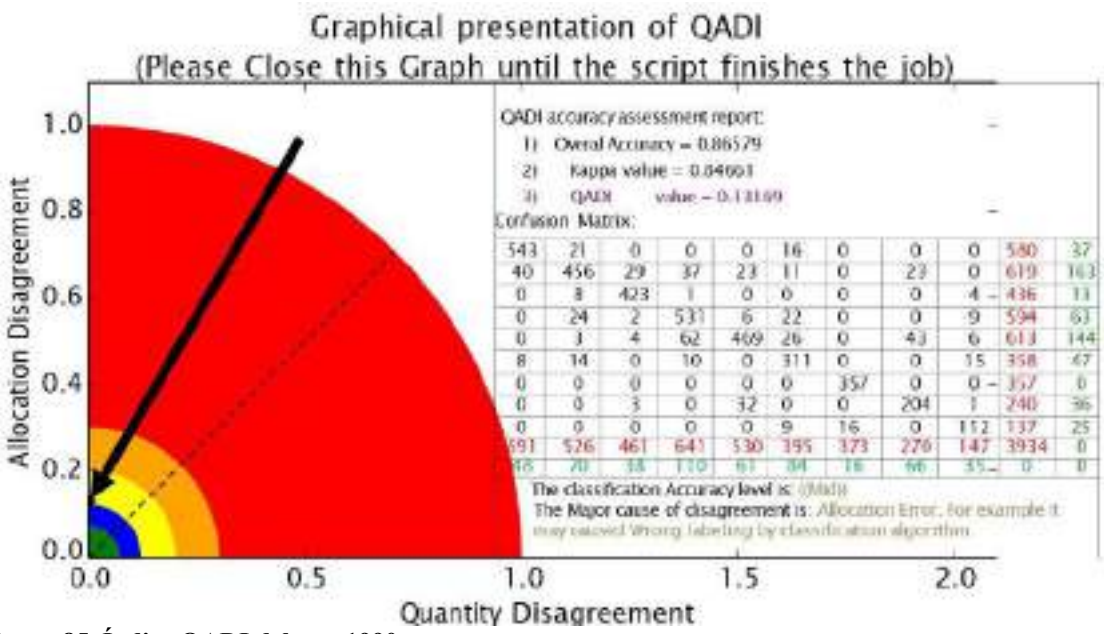


Figura 85. Índice QADI del año 1990
Fuente. Elaboración propia.

En resumen, los valores del índice de Kappa indican que la clasificación supervisada tuvo una fuerza de concordancia casi perfecta en los 4 años evaluados (ver Tabla 42). Asimismo, el índice QADI de los años 2023 y 2003, tuvo una alta confianza y bajo desacuerdo que sugiere una mayor precisión en la cantidad y ubicación de los píxeles clasificados respecto a los otros años. En el caso de los años 2013 y 1990, los valores QADI indican una moderada confianza y moderado desacuerdo generado principalmente por el desacuerdo de asignación se sugiere que existen algunos píxeles que están ubicados en una zona geográfica donde no les corresponde.

Tabla 42. Precisión global, Índices QADI y Kappa de los años 1990, 2003, 2013 y 2023

Año	Precisión global	Índice de Kappa		Índice QADI	
2023	87.72	0.86	Casi perfecta	0.11	Alta confianza
2013	87.96	0.86	Casi perfecta	0.12	Moderada confianza
2003	88.23	0.87	Casi perfecta	0.11	Alta confianza
1990	86.58	0.85	Casi perfecta	0.13	Moderada confianza

Fuente. Elaboración propia.

Análisis por categorías de cobertura y uso de suelo:

En la Tabla 43 se presenta el resumen de los resultados de la exactitud del usuario (%), error de comisión (%), exactitud del productor (%) y error de omisión (%); y a continuación se describen los hallazgos más relevantes:

- Áreas urbanizadas (AUR): La clasificación supervisada de los 4 años presentó buenos resultados (> 89.02 %) llegando a tener ligeras confusiones principalmente con la categoría de afloramientos rocosos y tierras desnudas tal como se observa en las matrices de confusión.
- Áreas agrícolas heterogéneas (CULT): En general se obtuvieron valores aceptables con exactitudes mayores a 73.67 %. En los años 2023 y 2003 se confundió principalmente con el herbazal abierto, mientras que en el 2013 fue con el herbazal denso y en el año 1990 con las áreas urbanizadas.
- Bosque (BOS): Los valores de exactitud son mayores a 85.05 %. En los años 2023 se confundió principalmente con cuerpos de agua, en el año 2013 adicionalmente se confundió con las áreas agrícolas heterogéneas, en el año 2003 fue con herbazal abierto y en el año 1990 con las áreas agrícolas heterogéneas.
- Herbazal abierto (HERA): Los valores de exactitud son mayores a 82.84 %. En los años 2023, 2013, 2003 se confundió principalmente con los afloramientos rocosos y tierras desnudas; en el año 2003 también fue con las áreas agrícolas heterogéneas, así como en el año 1990.
- Herbazal denso (HERD): Los valores de exactitud son mayores a 76.51 %. En el año 2023 se confundió principalmente con el herbazal abierto, en el año 2013 fue con las áreas agrícolas heterogéneas; y en los años 2003 y 1990 fue con las turberas y bofedales.
- Afloramientos rocosos y tierras desnudas (ARTD): Los valores de exactitud son mayores a 78.73 %. En los años 2023, 2013 y 2003 se confundió principalmente con las áreas urbanizadas; mientras que en el año 1990 fue con los cuerpos de agua.
- Glaciares (GLA): Los valores de exactitud son mayores a 94.09 %. Esta categoría presentó buenos resultados en la clasificación supervisada, solo en el año 2023 se observó que se confundió con los cuerpos de agua.

- Turberas y bofedales (BOF): Los valores de exactitud son mayores a 67.54 %. En los años 2023 y 1990 se confundieron con herbazal denso; y en los años 2013 y 2003 con bosque
- Cuerpos de agua (lagos, lagunas y ríos): Los valores de exactitud son mayores a 55.88 %. En los 4 años se confundieron principalmente con glaciares.

Tabla 43. Resumen de la exactitud y errores de los años 1990, 2003, 2013 y 2023 según categoría y uso de suelo

Descripción	Áreas urbanizadas	Áreas agrícolas heterogéneas	Bosque	Herbazal abierto	Herbazal denso	Afloramientos rocosos y tierras desnudas	Glaciares	Turberas y bofedales	Cuerpos de agua (Lagos, lagunas y ríos)
Código	**AUR**	**CULT**	**BOS**	**HERA**	**HERD**	**ARTD**	**GLA**	**BOF**	**AGU**
Año 2023									
Exactitud del usuario (%)	*96.65*	78.8	87.22	93.94	89.19	86.41	96.95	71.3	80.85
Error de comisión (%)	*3.35*	21.2	12.78	6.06	10.81	13.59	3.05	28.7	19.15
Exactitud del productor (%)	*94.66*	91.04	89.96	85.83	81.25	85.75	94.09	89.26	55.88
Error de omisión (%)	*5.34*	8.96	10.04	14.17	18.75	14.25	5.91	10.74	44.12
Año 2013									
Exactitud del usuario (%)	96.83	75.88	94.61	96.31	88.72	85.07	*100.00*	67.54	85.31
Error de comisión (%)	3.17	24.12	5.39	3.69	11.28	14.93	*0.00*	32.46	14.69
Exactitud del productor (%)	94.18	87.96	85.05	84.19	77.46	91.35	94.05	*95.56*	87.77
Error de omisión (%)	5.82	12.04	14.95	15.81	22.54	8.65	5.95	*4.44*	12.23
Año 2003									
Exactitud del usuario (%)	97.19	76.40	91.06	88.46	85.59	83.46	*100.00*	91.73	84.85
Error de comisión (%)	2.81	23.60	8.94	11.54	14.41	16.54	*0.00*	8.27	15.15
Exactitud del productor (%)	89.02	91.41	87.64	82.66	92.23	84.52	*96.5*	86.3	77.78
Error de omisión (%)	10.98	8.59	12.36	17.34	7.77	15.48	*3.5*	13.7	22.22
Año 1990									
Exactitud del usuario (%)	93.62	73.67	97.02	89.39	76.51	86.87	*100.00*	85.00	81.75
Error de comisión (%)	6.38	26.33	2.98	10.61	23.49	13.13	*0.00*	15.00	18.25

Descripción	Áreas urbanizadas	Áreas agrícolas heterogéneas	Bosque	Herbazal abierto	Herbazal denso	Afloramientos rocosos y tierras desnudas	Glaciares	Turberas y bofedales	Cuerpos de agua (Lagos, lagunas y ríos)
Código	**AUR**	**CULT**	**BOS**	**HERA**	**HERD**	**ARTD**	**GLA**	**BOF**	**AGU**
Exactitud del productor (%)	91.88	86.69	91.76	82.84	88.49	78.73	*95.71*	75.56	76.19
Error de omisión (%)	8.12	13.31	8.24	17.16	11.51	21.27	*4.29*	24.44	23.81

Fuente. Elaboración propia.
Nota: Las celdas de color verde indican los máximos valores tanto de la exactitud del usuario o productor; y las celdas de color plomo indican los valores mínimos de ambos parámetros en cada año de evaluación.

Como se detalló en el *Ìtem 3.6.3.2 Generación de áreas (muestras) de entrenamiento*, la delimitación de las áreas de entrenamiento siguió un proceso metodológico que consistió en el análisis de firmas espectrales y análisis de separabilidad espectral de Jeffries-Matusita; así como el uso de información complementaria con la finalidad de delimitar áreas con alto grado de representatividad para la clasificación supervisada y así reducir el error. No obstante, tal como se observó en diferentes investigaciones que implican la clasificación supervisada, no existen clasificaciones perfectas con un valor Kappa de 1.00.

Los errores están relacionados a las características de las imágenes que no tienen las suficientes bandas para clasificar a todas las categorías, la resolución espacial que no permite la separación de clases pequeñas, el algoritmo de clasificación usado e incluso las muestras de entrenamiento que no logran captar bien la separabilidad espectral. En ese sentido, para reducir al máximo los errores de clasificación, en la etapa de edición vectorial se revisó detalladamente las imágenes de Google Earth, CBER (solo para el año 2023), puntos GPS tomados en campo, índices NDVI, BSI; combinaciones RGB (ver Anexo 2); y específicamente para las turberas y bofedales también se revisó el inventario nacional de bofedales del 2023 realizado por el INAIGEM (https://geoportal.inaigem.gob.pe/).

Además, es importante recalcar que la ubicación espacial de las categorías está restringida por factores como la altitud y pendiente, por lo que se puede hablar de categorías que solo se observan en altitudes menores a 4100 m s. n. m. como las áreas urbanizadas, bosque y áreas agrícolas heterogéneas; mientras que el herbazal denso; glaciares; turberas y bofedales se presentaron por encima de esa altitud. En el caso del

herbazal abierto; afloramientos rocosos y tierras desnudas; y cuerpos de agua (lagos, lagunas y ríos) tienen un rango más amplio; sin embargo, en el caso del distrito la mayor parte de estas categorías están en altitudes altas.

5.2 Objetivo N°2: Dinámica del cambio de cobertura y uso de suelo para el periodo 1990-2023

5.2.1 Superficie de cobertura y uso de suelo

Los resultados de la clasificación supervisada de las imágenes Landsat de los años 1990, 2003, 2013 y 2023 muestran que existe una distribución espacial de las categorías que se mantiene constante a lo largo del tiempo. Las áreas urbanizadas, áreas agrícolas heterogéneas y la mayor parte del bosque se encuentran por debajo de los 4 100 m s.n.m y generalmente en áreas con pendientes menores al 15 %. Esto se debe a las características fisiográficas, la altitud y la temperatura.

5.2.1.1 Cobertura y uso de suelo en el año 1990.

Tal como se observa en la Tabla 44 y Figura 86, las 4 categorías más extensas fueron: herbazal abierto (HERA), áreas agrícolas heterogéneas (CULT); afloramientos rocosos y tierras desnudas (AR-TD); y herbazal denso (HERD) que tuvieron 8 357.94 ha (50.25 %), 2 834.82 ha (17.04 %), 2 081.43 ha (12.51 %) y 1 346.13 ha (8.09 %) respectivamente. Mientras que, las áreas urbanizadas (AUR) y bosque (BOS) ocuparon 914.31 ha (5.50 %) y 459.72 ha (2.76 %) respectivamente.

Por otra parte, las 3 categorías de menor extensión fueron las turberas y bofedales (BOF), glaciares (GLA) y los cuerpos de agua (AGU) que tuvieron superficies de 293.85 ha (1.77 %), 273.15 ha (1.64 %) y 71.37 ha (0.43 %) respectivamente.

Según la ubicación espacial de las categorías (ver figura 87) toda la superficie de áreas urbanizadas (AUR), áreas agrícolas heterogéneas (CULT) y bosque (BOS) se encuentra en zonas con altitudes menores a 4 100 m s. n. m. Además, se evidencia una clara predominancia de las áreas agrícolas, cuya superficie triplicaba la extensión de las áreas urbanizadas

5.2.1.2 Cobertura y uso de suelo en el año 2003.

Tal como se observa en la Tabla 44 y Figura 87, al igual que en el año 1990 las 4 categorías más extensas fueron: herbazal abierto (HERA), áreas agrícolas heterogéneas (CULT); afloramientos rocosos y tierras desnudas (AR-TD); y herbazal denso (HERD) que tuvieron 8 437.50 ha (50.73 %), 2 384.10 ha (14.33 %) y 2 189.43 ha (13.16 %) y 1 343.25 ha (8.08 %). respectivamente. Asimismo, las áreas urbanizadas (AUR) y bosque (BOS) ocuparon 1 159.74 ha (6.97 %) y 538.29 ha (3.24 %) respectivamente.

Por otra parte, las 3 categorías de menor extensión fueron las turberas y bofedales (BOF), glaciares (GLA) y los cuerpos de agua (AGU) que tuvieron superficies de 293.13 ha (1.76 %), 233.01 ha (1.40 %) y 54.27 ha (0.33 %) respectivamente. En relación con la distribución espacial de las categorías, sigue un patrón similar a lo observado en el año 1990 (ver Figura 88).

5.2.1.3 Cobertura y uso de suelo en el año 2013.

Se observa una tendencia similar a los años 1990 y 2003, las 3 categorías con mayor extensión fueron el herbazal abierto (HERA); áreas agrícolas heterogéneas (CULT); y afloramientos rocosos y tierras desnudas (AR-TD) que ocuparon 8 239.95 ha (49.54 %), 2 203.82 ha (13.25 %) y 2 175.57 ha (13.08 %) respectivamente. No obstante, las áreas urbanizadas (AUR) pasaron a ocupar el cuarto lugar ya que se incrementaron a 1 348.65 ha (8.11 %) y el herbazal denso (HERD) tuvo una superficie de 1 338.66 ha (8.05 %). El bosque también se incrementó a 750.96 ha (4.51 %).

Por otra parte, las turberas y bofedales (BOF) glaciares (GLA) y cuerpos de agua (AGU) ocuparon 287.91 ha (1.73 %), 224.73 ha (1.35 %) y 62.37 ha (0.37 %) respectivamente. En relación con su distribución espacial, sigue una tendencia similar a lo observado en los años anteriores (ver Figura 89).

5.2.1.4 Cobertura y uso de suelo en el año 2023.

Tal como se observa en la Tabla 44 y Figura 90, el herbazal abierto (HERA) siguió ocupando el primer lugar con una superficie de 8 111.88 ha (48.77 %); sin embargo, los afloramientos rocosos pasaron al segundo lugar con una extensión de 2 194.29 ha (13.19 %). Además, en este año, se registró que las áreas urbanizadas con una extensión de 1 799.82 (10.82 %) sobrepasaron en superficie a las áreas agrícolas heterogéneas que

se redujeron a 1 692.27 ha (10.17 %). Las categorías de herbazal denso (HERD) y bosque (BOS) ocuparon superficies de 1362.15 (8.19 %) y 983.7 (5.91 %) respectivamente.

Por otra parte, al igual que en años anteriores las 3 categorías de menor extensión fueron las turberas y bofedales (BOF), glaciares (GLA) y los cuerpos de agua (AGU) que tuvieron superficies de 254.52 ha (1.53 %), 182.34 ha (1.10 %) y 51.75 ha (0.31 %) respectivamente. En relación con la distribución espacial de las categorías, sigue un patrón similar a lo observado en el año 1990 (ver Figura 88).

Tabla 44. Superficie de las categorías de cobertura y uso de suelo para el periodo 1990 – 2023

Descripción	Año 1990		Año 2003		Año 2013		Año 2023	
	Área (ha)	Porcentaje (%)	Área (ha)	Porcentaje (%)	Área (ha)	Porcentaje (%)	Área (ha)	Porcentaje (%)
Áreas urbanizadas (AUR)	914.31	5.5	1 159.74	6.97	1 348.65	8.11	1 799.82	10.82
Áreas agrícolas heterogéneas (CULT)	2 834.82	17.04	2 384.10	14.33	2 203.92	13.25	1 692.27	10.17
Bosque (BOS)	459.72	2.76	538.29	3.24	750.96	4.51	983.7	5.91
Herbazal abierto (HERA)	8 357.94	50.25	8 437.5	50.73	8 239.95	49.54	8 111.88	48.77
Herbazal denso (HERD)	1 346.13	8.09	1 343.25	8.08	1 338.66	8.05	1 362.15	8.19
Afloramientos rocosos y tierras desnudas (AR-TD)	2 081.43	12.51	2 189.43	13.16	2 175.57	13.08	2 194.29	13.19
Glaciares (GLA)	273.15	1.64	233.01	1.4	224.73	1.35	182.34	1.1
Turberas y bofedales (BOF)	293.85	1.77	293.13	1.76	287.91	1.73	254.52	1.53
Cuerpos de agua (AGU)	71.37	0.43	54.27	0.33	62.37	0.37	51.75	0.31

Fuente. Elaboración propia.

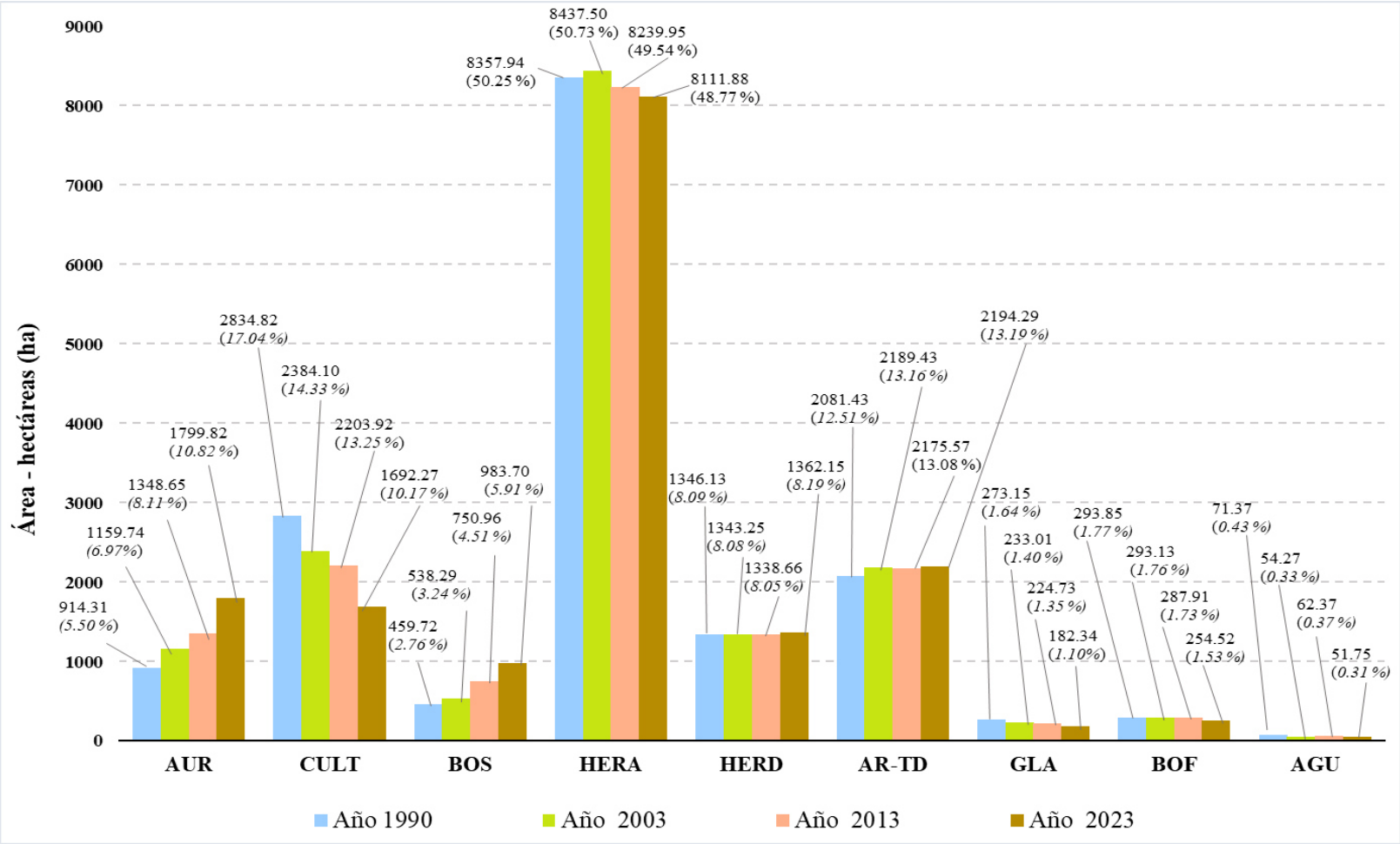


Figura 86. Superficie de las categorías de cobertura y uso de suelo para el periodo 1990-2023

Fuente. Elaboración propia.

Nota: Áreas urbanizadas (AUR), Áreas agrícolas heterogéneas (CULT), Bosque (BOS), Herbazal abierto (HERA), Herbazal denso (HERD), Afloramientos rocosos y tierras desnudas (AR-TD), Glaciares (GLA), Turberas y bofedales (BOF) y Cuerpos de agua (AGU).

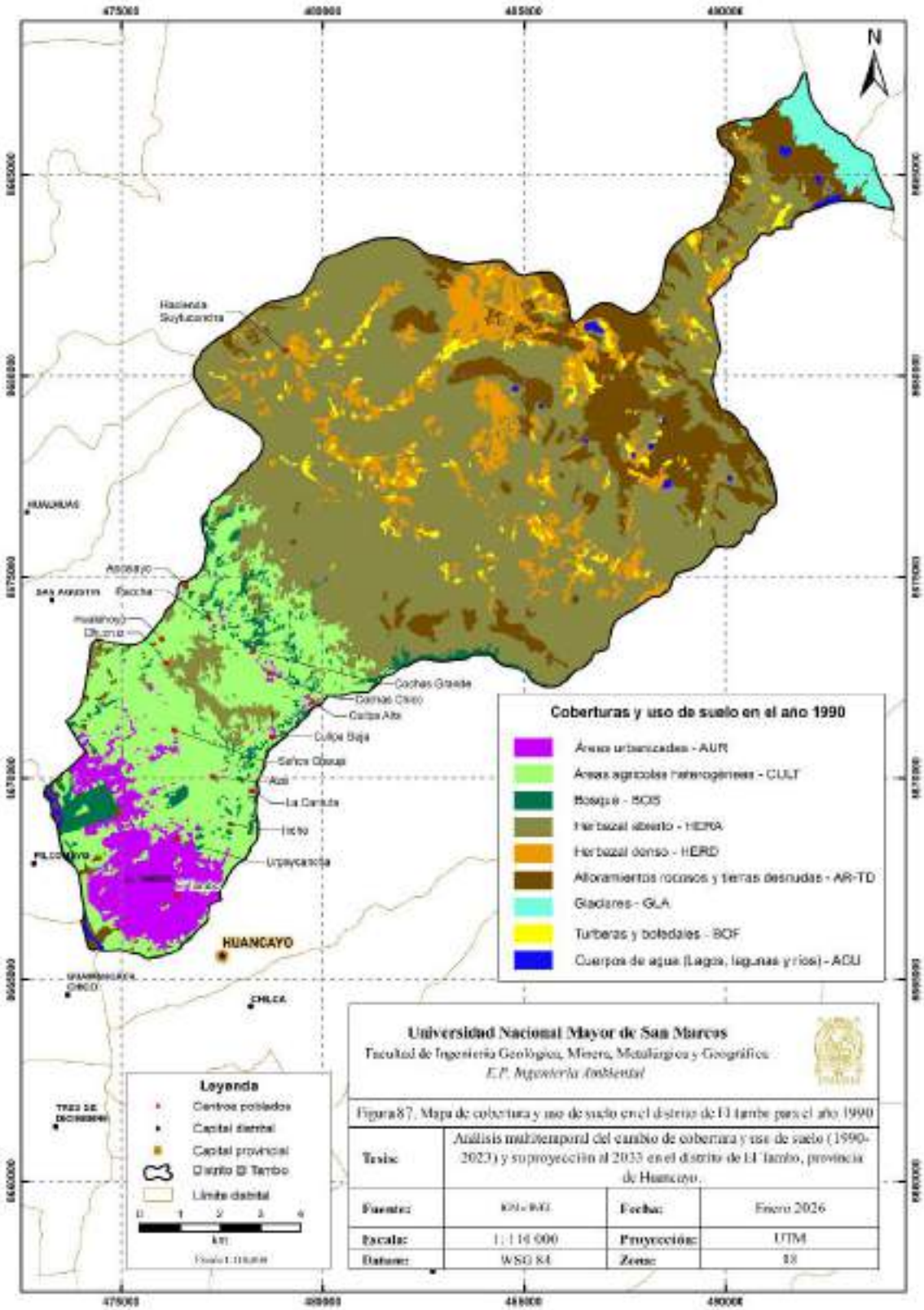


Figura 87. Mapa de cobertura y uso de suelo en el distrito de El Tambo para el año 1990
Fuente. Elaboración propia.

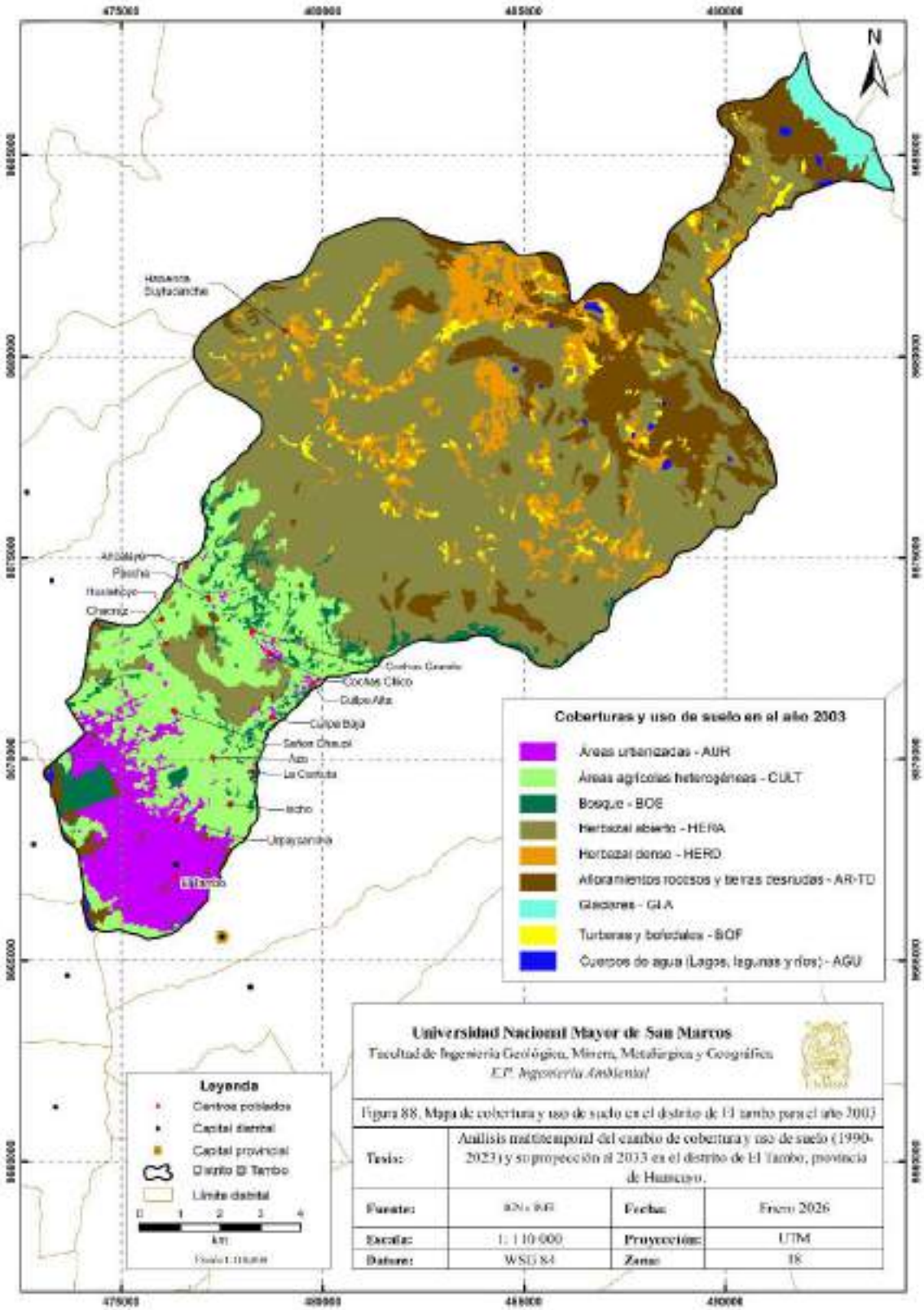


Figura 88. Mapa de cobertura y uso de suelo en el distrito de El Tambo para el año 2003
Fuente. Elaboración propia.

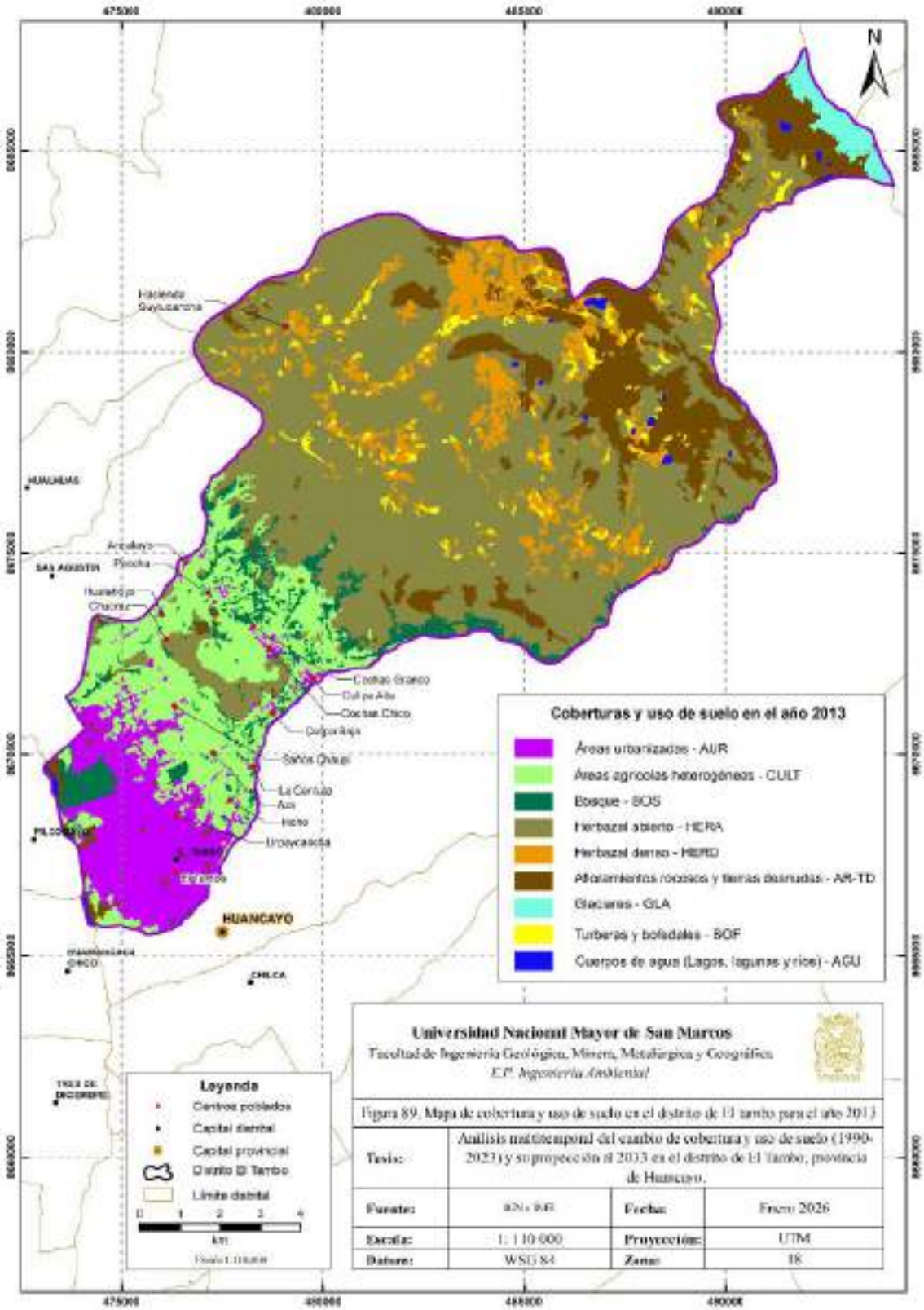


Figura 89. Mapa de cobertura y uso de suelo en el distrito de El Tambo para el año 2003
Fuente. Elaboración propia.

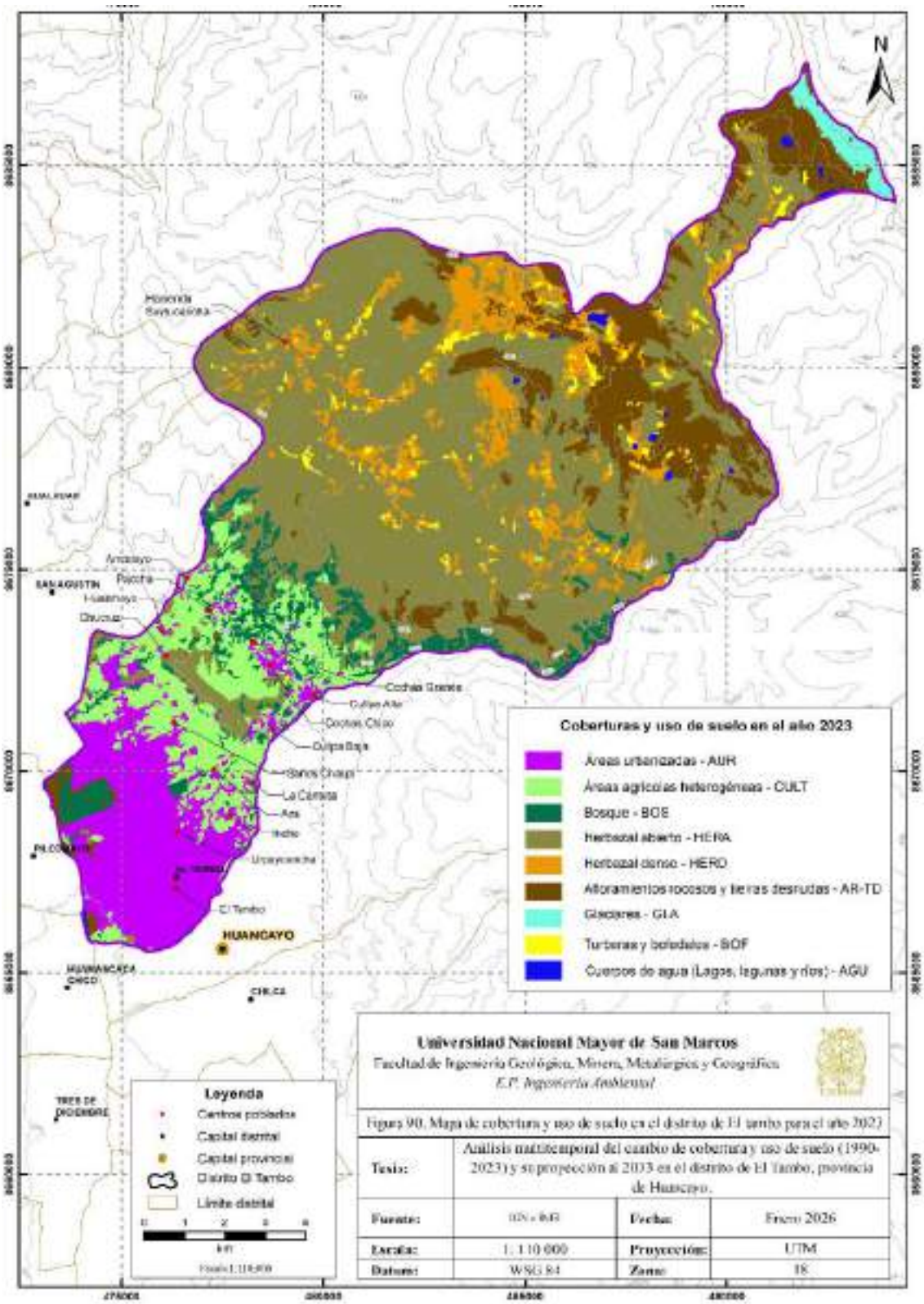


Figura 90. Mapa de cobertura y uso de suelo en el distrito de El Tambo para el año 2023
Fuente. Elaboración propia.

5.2.2 Análisis tendencial de la cobertura y uso de suelo

5.2.2.1 Áreas urbanizadas (AUR).

Presenta una tendencia creciente continua (ver Figura 91), en el año 1990 ocupó una superficie de 914.31 ha (5.50 %) y para el 2023 su extensión se duplicó llegando a 1 799 ha (10.82 %), esto representa una ganancia neta de 885.51 ha o el 96.76 % de su área inicial. En los periodos 1990-2003 y 2003-2013 se incrementó en 245.43 ha y 188.91 ha respectivamente; y en el intervalo 2013-2023 registró el mayor crecimiento (451.17 ha) que supera el crecimiento acumulado en los 23 años anteriores

5.2.2.2 Áreas agrícolas heterogéneas (CULT).

Presenta una disminución continua de su superficie (ver Figura 91), en el año 1990 ocupó una extensión de 2 834.82 ha (17.4 %) y se redujo a 1 692.27 ha (10.17 %), esto representa una pérdida neta de 1 142.55 ha (40.31 %). En los periodos 1990-2003 y 2003-2013 se redujo en 450.72 ha y 180.18 ha respectivamente; y en el periodo 2013-2023 registró la mayor pérdida de 511.65 ha que se acerca a lo acumulado en los 23 años anteriores.

5.2.2.3 Bosque (BOS).

Presenta una tendencia creciente continua (ver Figura 91), en el año 1990 ocupó una superficie de 459.72 ha (2.76 %) y para el 2023 su extensión fue de 983.70 ha (5.91 %), lo que representa 523.98 ha (113.97 %) más que su área inicial. En los periodos 1990-2003 y 2003-2013 se incrementó en 78.57 ha y 212.67 ha respectivamente; y en el periodo 2013-2023 registró el mayor crecimiento con 232.74 ha adicionales.

5.2.2.4 Herbazal abierto (HERA).

Presentó una tendencia decreciente (ver Figura 91), en el año 1990 tuvo una extensión de 8 357.94 ha (50.25 %) y se redujo a 8 111.88 ha (48.77 %) en el año 2023, esto representa una pérdida neta de 246.06 ha (2.94 %). En el periodo 1990-2003 aumentó su superficie en 79.56 ha; mientras que en los periodos 2003-2013 y 2013-2023 perdió 197.55 ha y 128.07 ha respectivamente.

5.2.2.5 Herbazal denso (HERD).

Presentó una tendencia creciente (ver Figura 91), en el año 1990 ocupó una superficie de 1 346.13 ha (8.09 %) y para el 2023 su extensión fue de 1 362.15 ha (8.19 %), esto representa un crecimiento neto de 16.02 ha (1.19 %). En los periodos 1990-2003

y 2003-2013 se redujo en 2.88 ha y 4.57 ha respectivamente; a diferencia del periodo 2013 -2023 donde registró 23.49 ha adicionales.

5.2.2.6 Afloramientos rocosos y tierras desnudas (AR-TD).

Presentó una tendencia creciente (ver Figura 91), en el año 1990 ocupó una superficie de 2 081.43 ha (12.51 %) y aumentó a 2 194.29 ha (13.19 %) para el 2023, esto representa el crecimiento neto de 112.86 ha (5.42 %). En el periodo 1990-2003 se incrementó en 108.00 ha; en el intervalo 2003-2013 perdió 13.86 ha y en el periodo 2013-2023 registró 18.72 ha adicionales.

5.2.2.7 Glaciares (GLA).

Presentó una tendencia decreciente constante (ver Figura 92), en el año 1990 tuvo una extensión de 273.15 ha (1.64 %) reduciéndose a 182.34 ha (1.10 %) en el año 2023, esto representa la pérdida neta de 90.81 ha (33.26 %) respecto a su área inicial. En los periodos 1990-2003 y 2003-2013 perdió 40.14 ha y 8.28 ha respectivamente; y en el periodo 2013-2023 registró la disminución de 42.39 ha.

5.2.2.8 Turberas y bofedales (BOF).

Presentó una tendencia decreciente constante (ver Figura 92), en el año 1990 tuvo una extensión de 293.85 ha (1.77 %) reduciéndose a 254.52 ha (1.53 %) en el año 2023, esto representa la pérdida neta de 39.33 ha (13.39 %). En el periodo 1990-2003 y 2003-2013 perdió 0.72 ha y 5.94 ha respectivamente; y en el periodo 2013-2023 registró la mayor pérdida con 33.39 ha que supera lo acumulado en los años anteriores.

5.2.2.9 Cuerpos de agua (AGU).

Presentó una tendencia decreciente (ver Figura 92), en el año 1990 ocupó una superficie de 71.37 ha (0.43 %) y para el 2023 su extensión fue de 51.75 ha (0.31 %), esto representa la pérdida neta de 19.62 ha (27.50 %). En el periodo 1990-2003 se redujo en 17.10 ha, en el periodo 2003-2013 aumentó 8.10 ha y en el periodo 201 -2023 registró la pérdida de 10.62 ha.

Figura 91. Tendencia del cambio de cobertura y uso de suelo para el periodo 1990-2023 - Parte 1
Fuente. Elaboración propia.

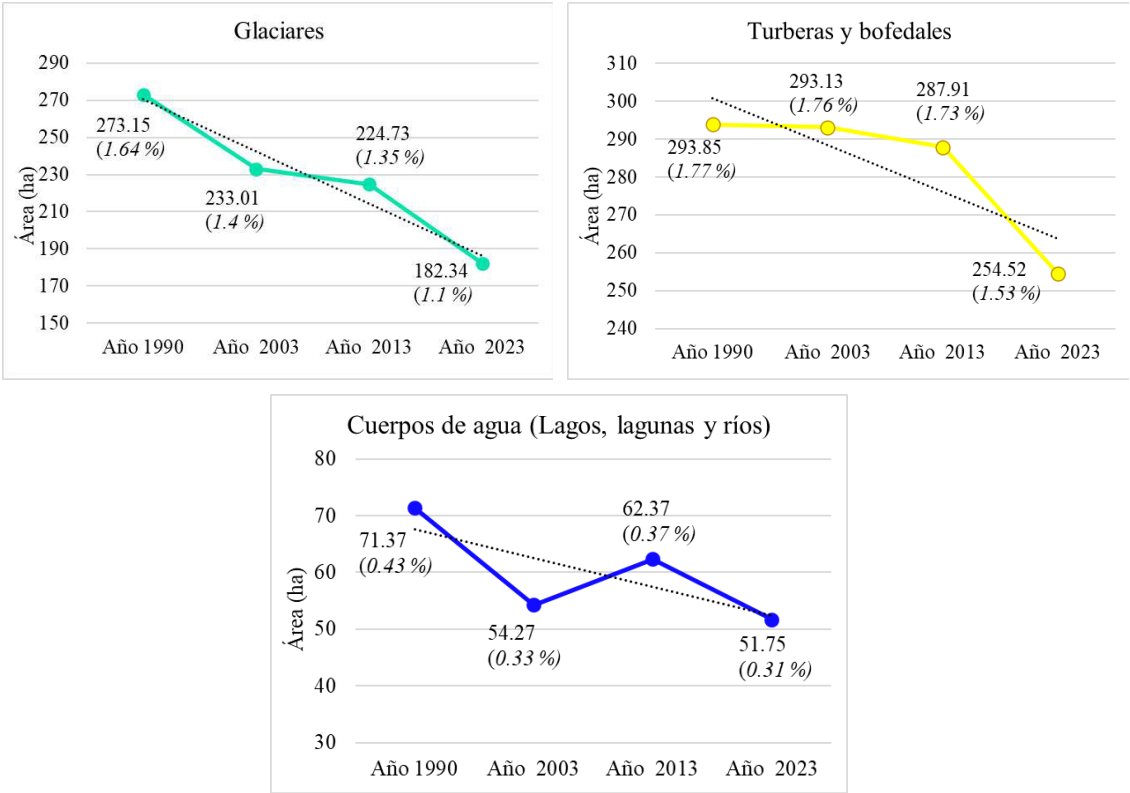


Figura 92. Tendencia del cambio de cobertura y uso de suelo para el periodo 1990-2023 - parte 2
Fuente. Elaboración propia.

5.2.3 Análisis de intensidad de cambio

En este apartado se utilizaron las matrices de cambio de los periodos 1990-2003, 2003- 2013 y 2013-2023 para realizar el análisis de intensidad de cambio a nivel de intervalo de tiempo, nivel de categoría y nivel de transición.

5.2.3.1 Intensidad del cambio - Nivel de intervalo de tiempo.

Se obtuvo una tasa de cambio uniforme del periodo de evaluación y las tasas de cambio anual de cada subintervalo. Se considera como intensidad de cambio "rápido" cuando la intensidad de cambio anual supera la tasa de cambio uniforme, caso contrario se considera como intensidad de cambio "lento" (López & Monterroso, 2024).

Tal como se observa en la Tabla 45 y en la Figura 93, en el periodo 1990-2003 la superficie que cambió fue de 1 090.17 ha lo que representa una tasa de cambio anual de 0.50. En el intervalo de 2003-2013 se calculó un cambio de 704.76 ha y una tasa de cambio anual de 0.42. Para el periodo 2013-2023 se identificó el cambio en 1 375 ha y una tasa

de cambio anual de 0.83. Sin embargo, la tasa de cambio uniforme para el periodo 1990-2023 es de 0.58, por lo que solo el último intervalo tuvo una intensidad de cambio rápido

Tabla 45. Tasa de cambio para los periodos 1990-2003, 2003-2013 y 2013-2023

Cambio		NO	SI	Tasa de cambio
Periodo total 1990-2023	**Área (ha)**	14 343.3	2 289.42	**0.58***
	Porcentaje (%)	86.24	13.76	
Periodo 1990-2003	**Área (ha)**	15 542.55	1 090.17	**0.5****
	Porcentaje (%)	93.45	6.55	
Periodo 2003-2013	**Área (ha)**	15 927.93	704.79	**0.42****
	Porcentaje (%)	95.76	4.24	
Periodo 2013-2023	**Área (ha)**	15 256.89	1 375.83	**0.83****
	Porcentaje (%)	91.73	8.27	

Fuente. Elaboración propia.
Nota: (*) Tasa de cambio uniforme. (**) Tasa de cambio anual. La celda en plomo significa que supera la tasa de cambio uniforme y que corresponde a una intensidad de cambio "rápido".

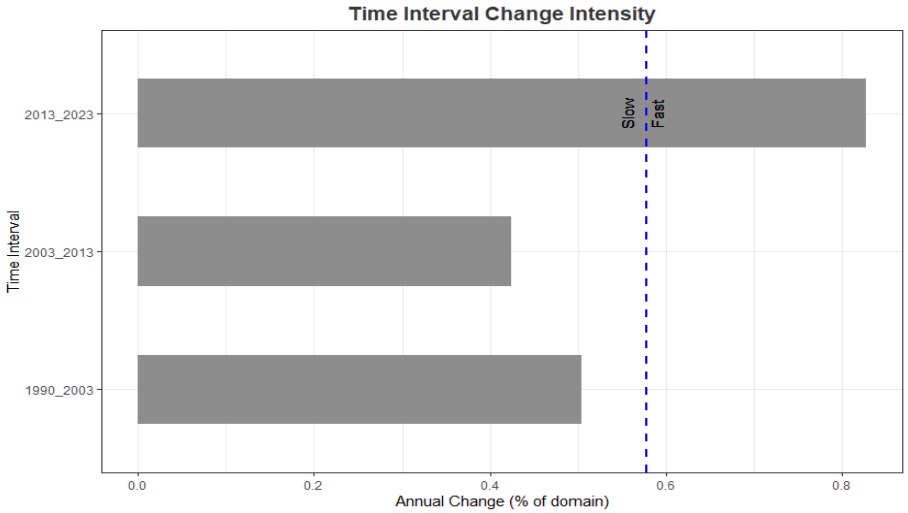


Figura 93. Intensidad del cambio - Nivel de intervalo de tiempo
Fuente. Elaboración propia.

El cambio neto es de 2 289.42 ha que equivale al 13.76 % del distrito de El Tambo, mientras que los otros intervalos tuvieron cambios que representan menos del 9 % de la superficie (ver Figura 94). A nivel espacial, en la Figura 95 se observa que las áreas de cambio se concentran en la zona suroeste del distrito, mayormente en áreas menores a 4 100 m s. n. m.

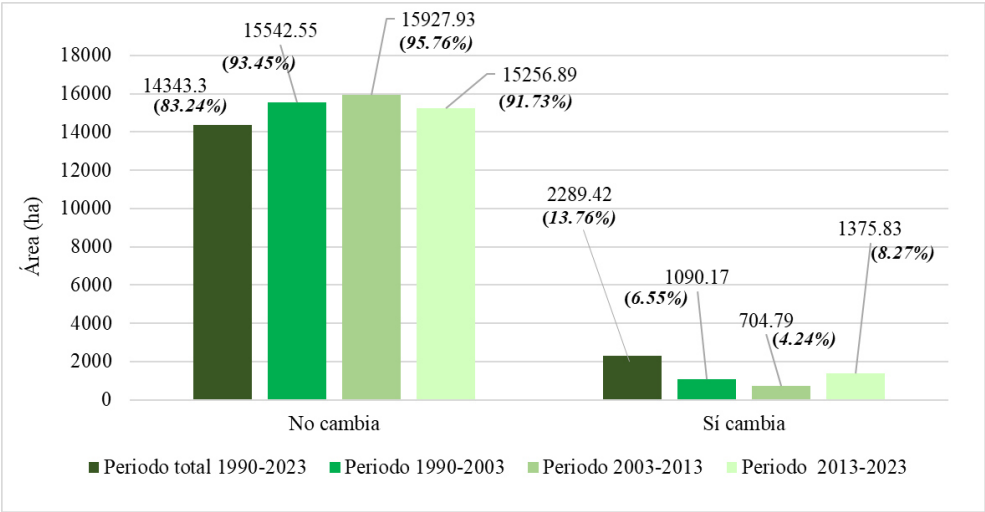


Figura 94. Áreas de cambio y no cambio para los periodos 1990-2023, 1990-2003, 2003-2013 y 2013-2023
Fuente. Elaboración propia.

Tal como se observa en la Figura 96, Figura 97 y Figura 98, las áreas de cambio en los 3 periodos se distribuyen principalmente en la parte baja y media del distrito. Se presentan en la periferia de la ciudad y se incrementaron en áreas colindantes al río Shullcas. Además, en el último periodo se observan más áreas de cambio cerca de los centros poblados.

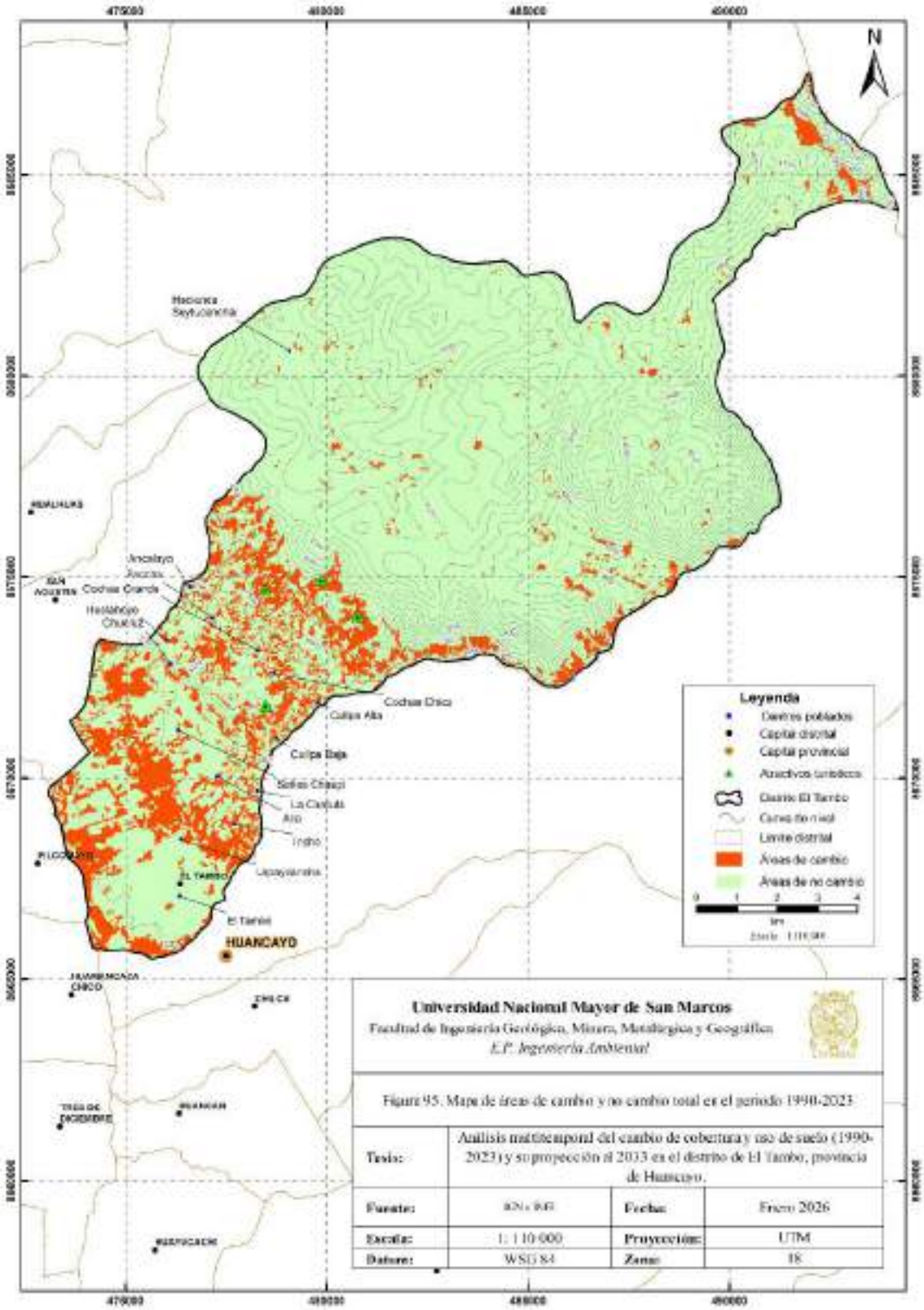


Figura 95. Mapa de áreas de cambio y no cambio total para el periodo 1990-2023
Fuente. Elaboración propia.

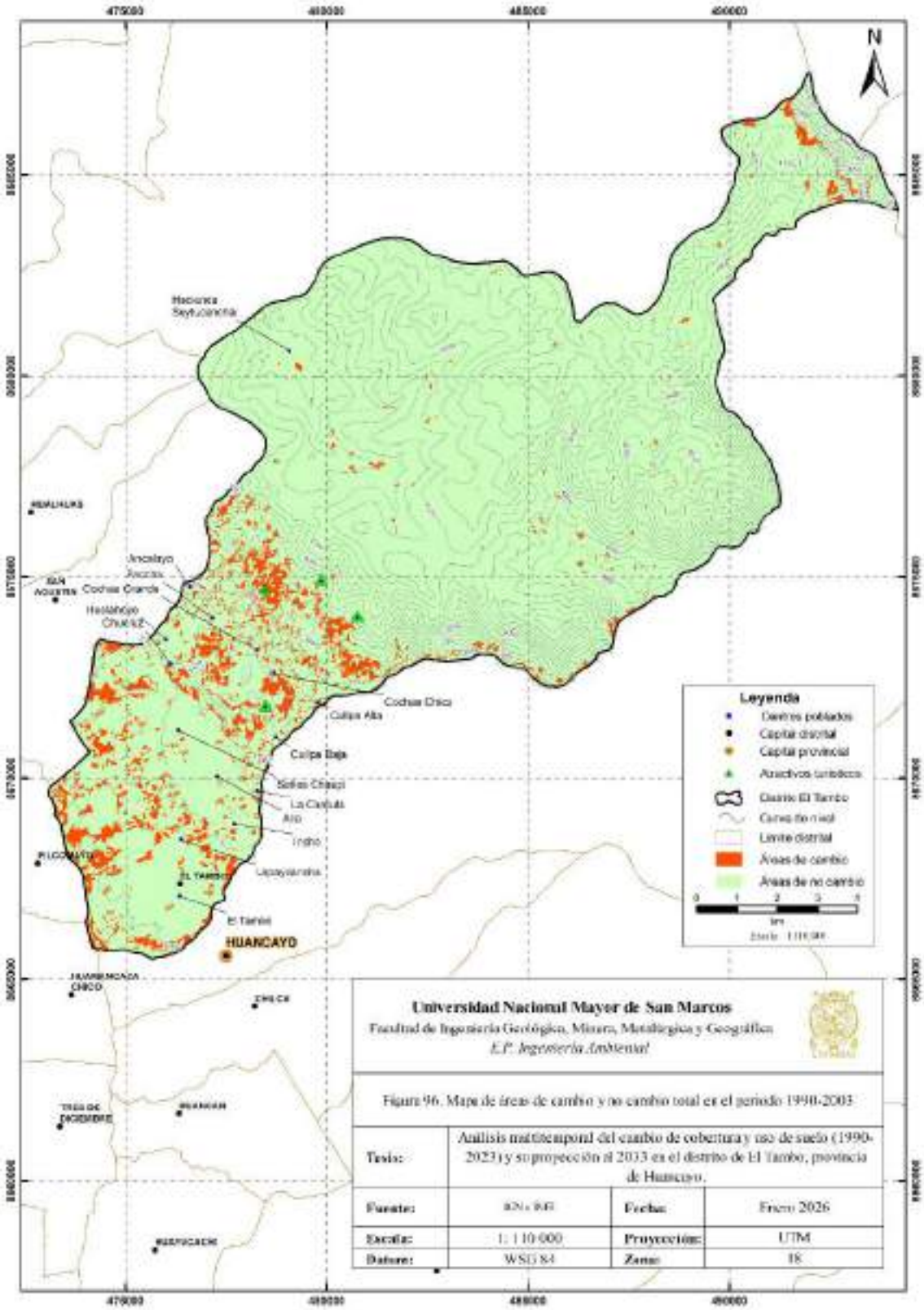


Figura 96. Mapa de áreas de cambio y no cambio total para el periodo 1990-2003
Fuente. Elaboración propia.

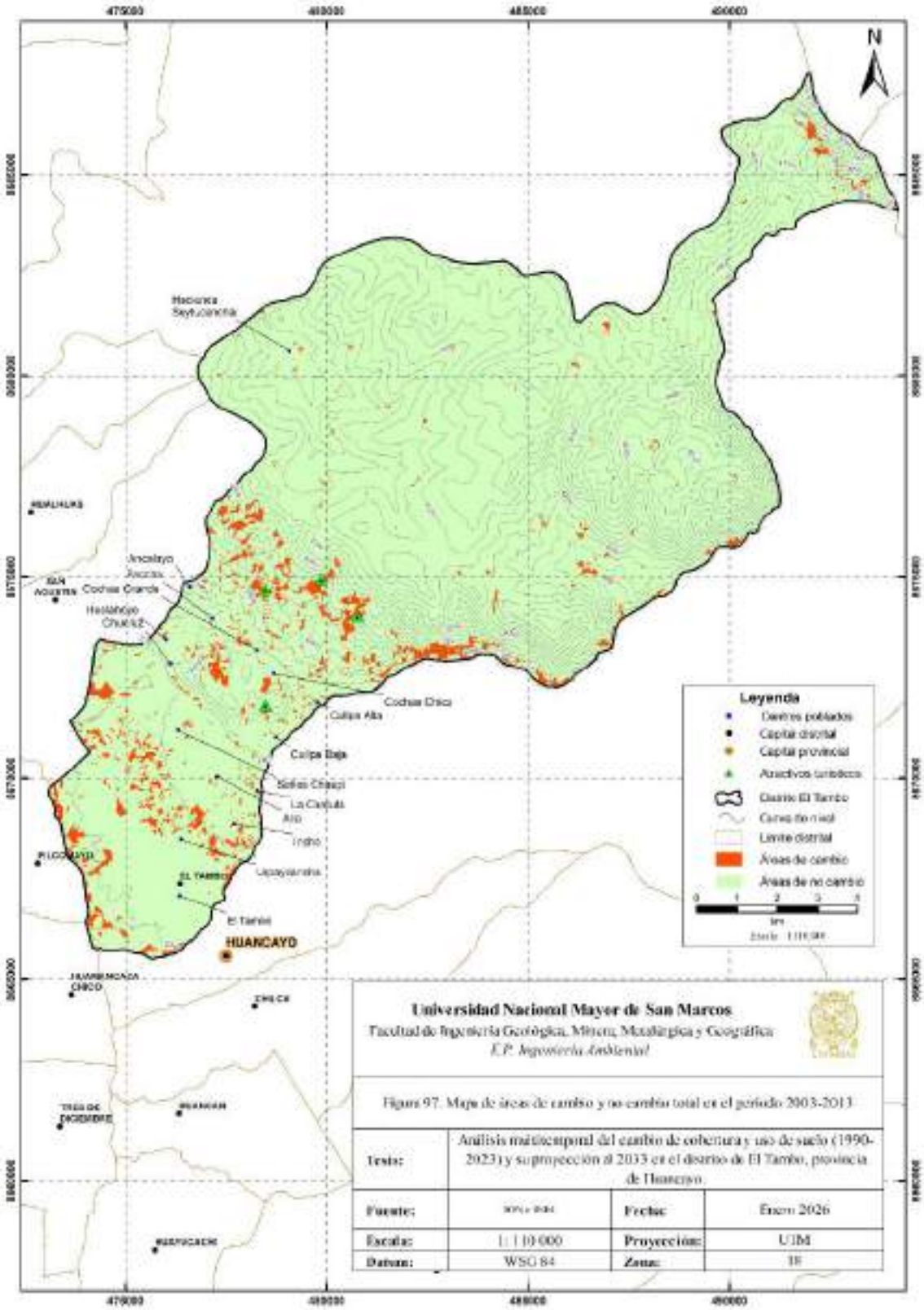


Figura 97. Mapa de áreas de cambio y no cambio total para el periodo 2003-2013
Fuente. Elaboración propia.

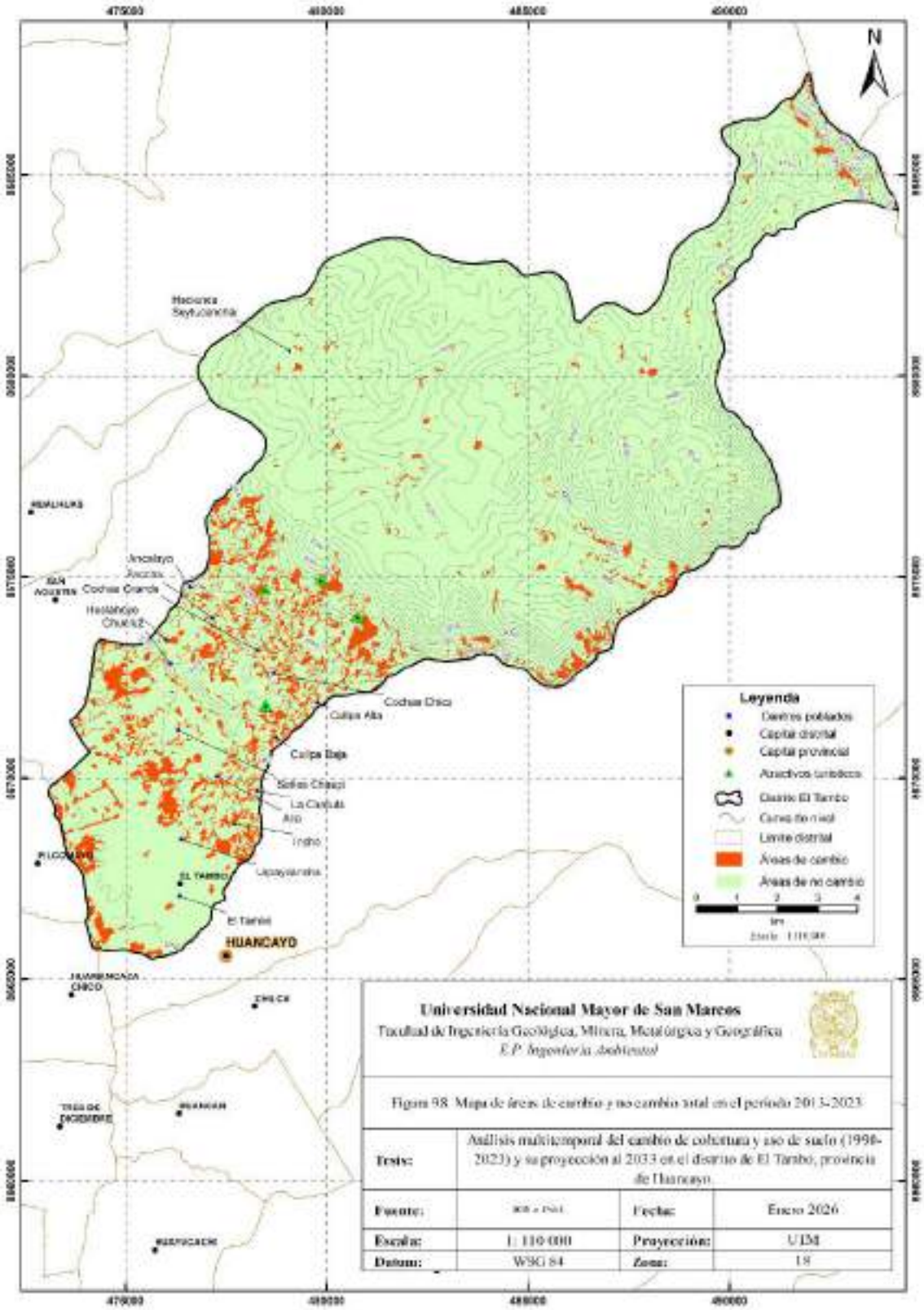


Figura 98. Mapa de áreas de cambio y no cambio total para el periodo 2013-2023
Fuente. Elaboración propia.

Los mapas de densidad de Kernel que se observan en la Figura 99, permiten identificar la densidad de la distribución espacial de las transiciones de cobertura y uso de suelo en los periodos 1990-2003, 2003-2013 y 2013-2023. Es decir, resalta las zonas donde existió mayor dinamismo en términos del número de transiciones mas no en el tamaño de estas transiciones.

En todos los intervalos se observa una concentración de las transiciones en la parte baja del distrito donde predominan las áreas urbanizadas. El otro núcleo de mayor concentración inicia en los centros poblados de Cochas Grande y Chucruz en el periodo 1990-2003, y se distribuye hacia los lugares turísticos (Bosque Dorado, Bosque 7 leyendas y Bosque de los Pinos) en el periodo 2003-2013. Finalmente, en el último intervalo aparecen nuevos focos de concentración en áreas próximas a los centros poblados que limitan con el distrito de Huancayo.

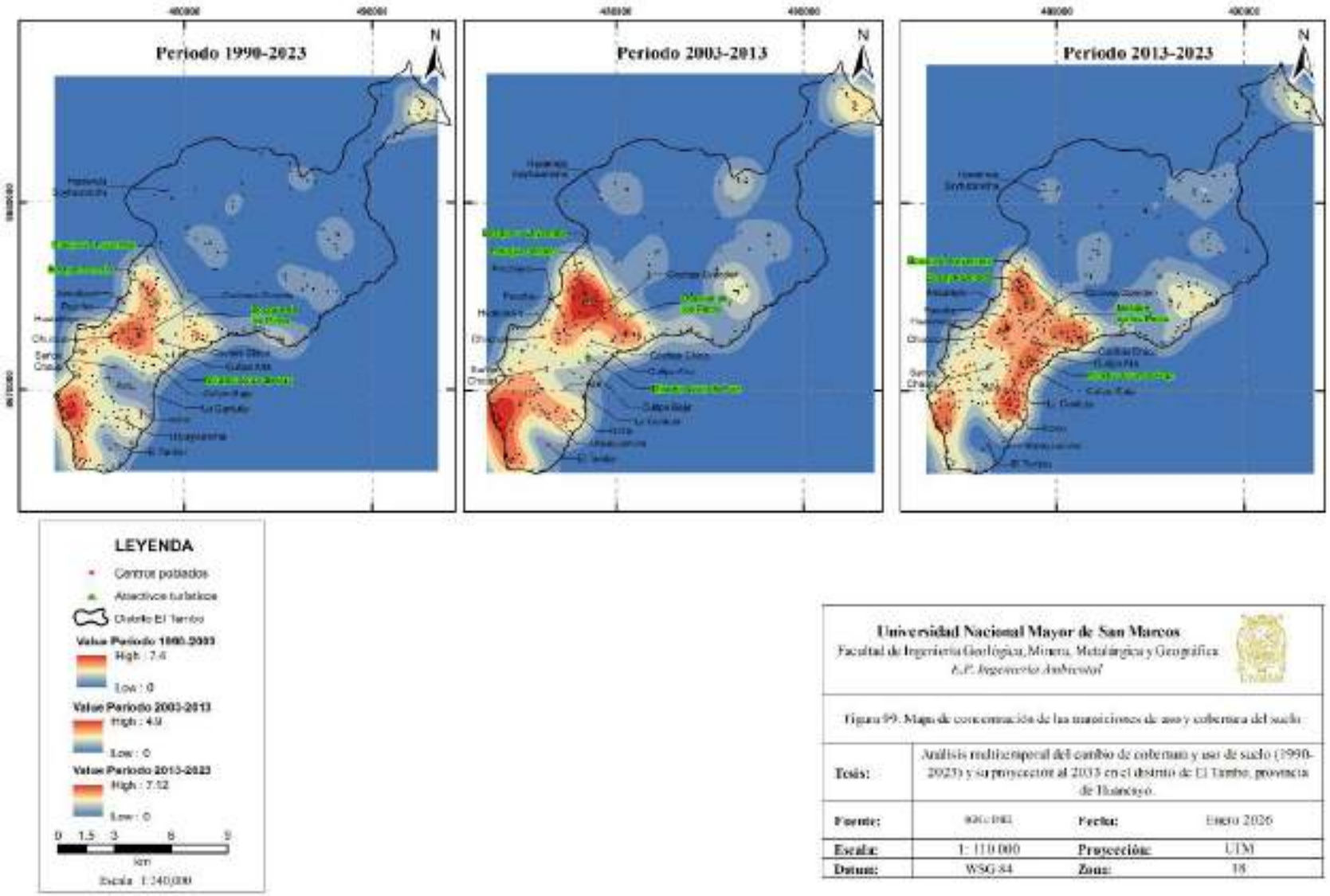


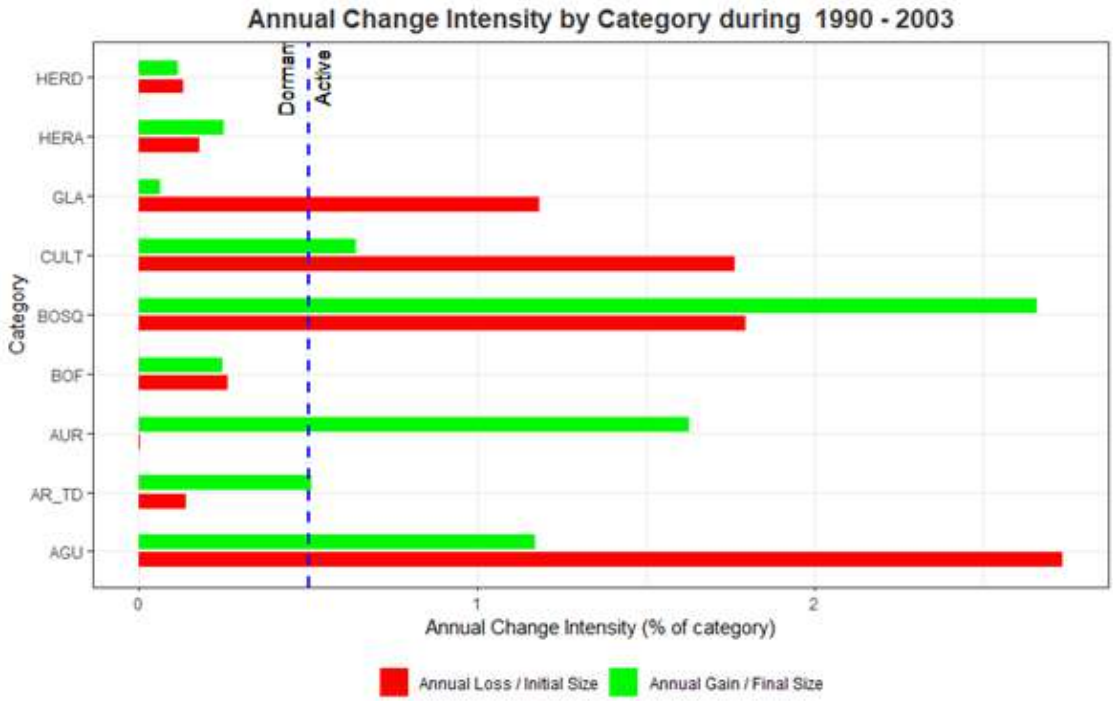
Figura 99. Mapa de concentración de las transiciones de cobertura y uso de suelo
Fuente: Elaboración propia.

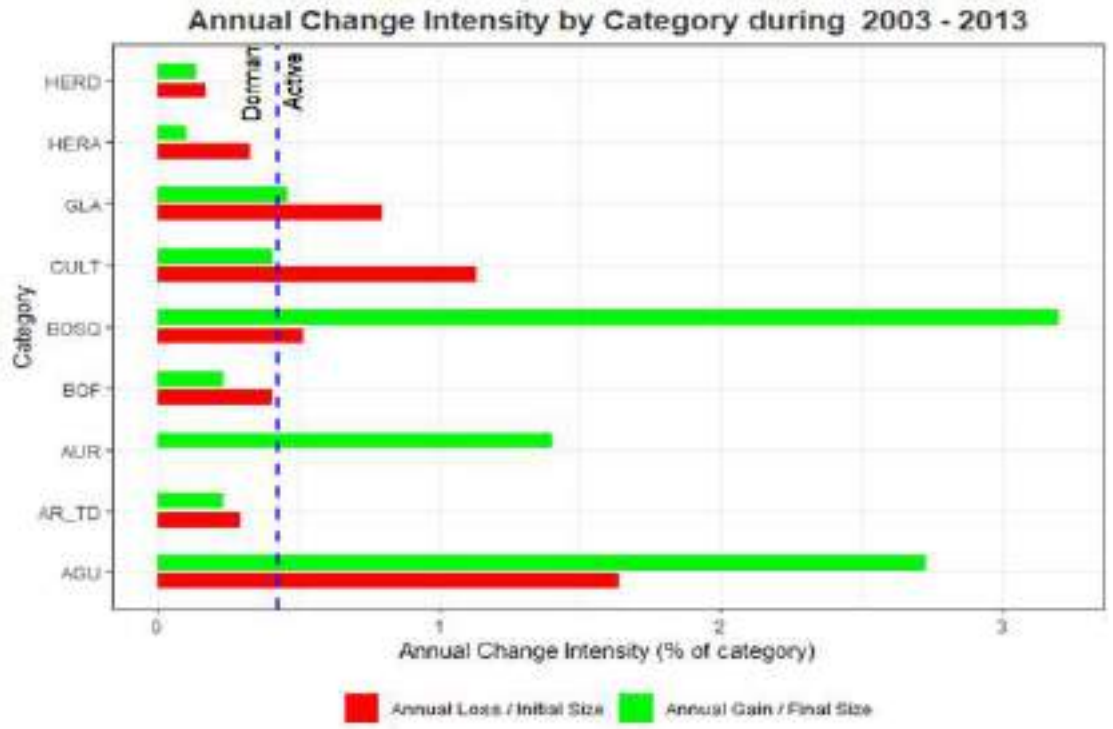
5.2.3.2 Intensidad del cambio - Nivel de categoría.

El nivel de categoría permite identificar las categorías activas o latentes (persistente). Se define como "categoría persistente" a una categoría de cobertura y uso de suelo donde la intensidad de su cambio (ganancia o pérdida) es menor que la intensidad de cambio uniforme (tasa de cambio total), caso contrario se considera como categoría “activa” (López & Monterroso, 2024).

Tal como se observa en la Figura 100, las categorías de cobertura y uso de suelo tienen comportamientos contrastantes, donde hay 5 categorías activas que se mantienen en los 3 intervalos: áreas urbanizadas (AUR), áreas agrícolas heterogéneas (CULT), bosque (BOS), glaciares (GLA) y cuerpos de agua (AGU); y solo en el último intervalo, también las turberas y bofedales (BOF). Se precisa que, los periodos 1990-2003 y 2003-2013 la tasa de cambio anual fue de 0.50 y 0.42 respectivamente; mientras que para el periodo 2013-2023 fue de 0.83.

Las áreas urbanizadas (AUR) reflejan una dinámica de expansión constante y dinámica; en el caso de los cultivos se observan mayores pérdidas que ganancias activas, lo que sugiere un proceso de abandono y/o transformación hacia otras categorías. En el caso del bosque (BOS) es la categoría con mayor intensidad de cambio de ganancia en los 3 intervalos. Respecto a los glaciares (GLA) y cuerpos de agua (AGU), principalmente lagunas, a pesar de estar lejos de la influencia directa de actividades antrópicas, fueron categorías activas y dinámicas. El resto de las categorías, al ser latentes (persistentes) se consideran más estables en los intervalos evaluados.


Annual Change Intensity by Category during 1990 - 2003
Dormant
Active
HERD
HERA
GLA
CULT
BOSQ
BOF
AUR
AR_TD
AGU
Category
0
1
2
Annual Change Intensity (% of category)
Annual Loss / Initial Size
Annual Gain / Final Size


Annual Change Intensity by Category during 2003 - 2013
Dormant
Active
HERD
HERA
GLA
CULT
BOSQ
BOF
AUR
AR_TD
AGU
Category
0
1
2
3
Annual Change Intensity (% of category)
Annual Loss / Initial Size
Annual Gain / Final Size

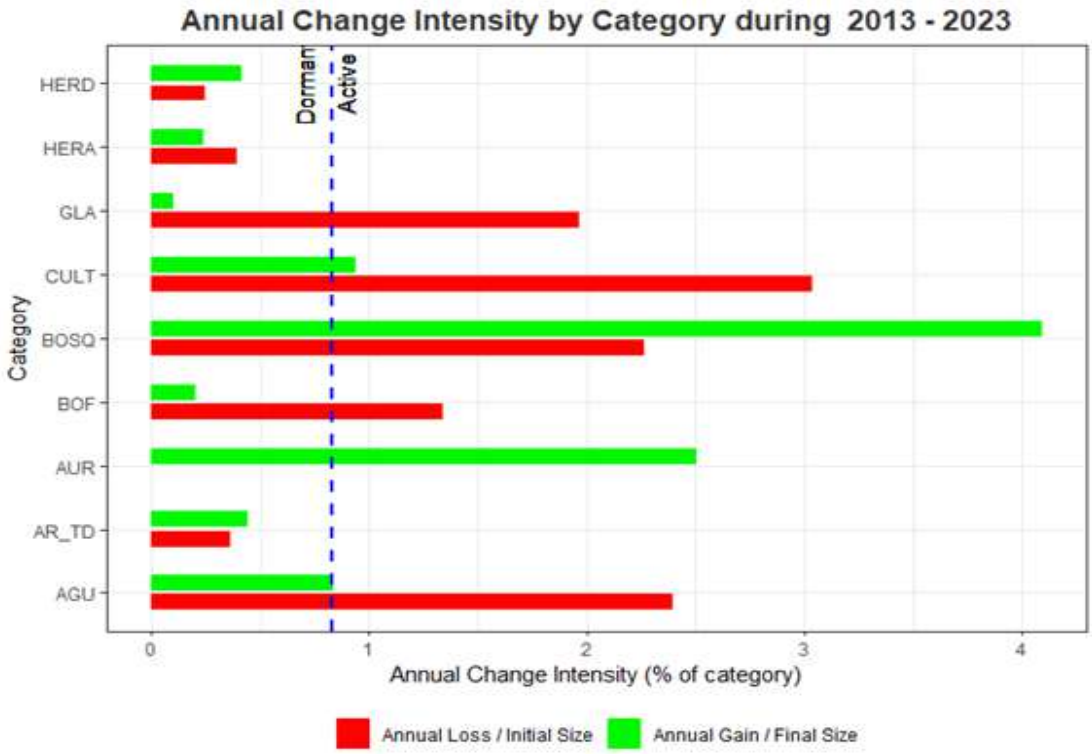


Figura 100. Análisis de intensidad de cambio – nivel de categoría
Fuente: Elaboración propia.

Tal como se observa en los 3 intervalos (Tabla 46), las áreas urbanizadas (AUR) y las agrícolas heterogéneas (CULT) fueron las 2 categorías que tuvieron más ganancia o pérdida neta respectivamente; seguido del bosque (BOS) y herbazal abierto (HERA). Además, tal como se observa en la Figura 101, el herbazal abierto en todos los años representa más del 40 % de la superficie del distrito.

Tabla 46. Cambio y no cambio de cobertura y uso de suelo para el periodo 1990-2023

Número	Descripción	Código	Año 1990		Año 2003		Año 2013		Año 2023		Análisis de intensidad -Nivel de categoría (Ganancias o pérdidas netas - ha)		
			Área (ha)	Porcentaje (%)	Área (ha)	Porcentaje (%)	Área (ha)	Porcentaje (%)	Área (ha)	Porcentaje (%)	Periodo 1990-2003	Periodo 2003-2013	Periodo 2013-2023
1	Áreas urbanizadas	AUR	914.31	5.5	1 159.74	6.97	1 348.65	8.11	1 799.82	10.82	245.43	188.91	451.17
2	Áreas agrícolas heterogéneas	CULT	2 834.82	17.04	2 384.10	14.33	2 203.92	13.25	1 692.27	10.17	-450.72	-180.18	-511.65
3	Bosque	BOS	459.72	2.76	538.29	3.24	750.96	4.51	983.7	5.91	78.57	212.67	232.74
4	Herbazal abierto	HERA	8 357.94	50.25	8 437.50	50.73	8 239.95	49.54	8 111.88	48.77	79.56	-197.55	-128.07
5	Herbazal denso	HERD	1 346.13	8.09	1 343.25	8.08	1 338.66	8.05	1 362.15	8.19	-2.88	-4.59	23.49
6	Afloramientos rocosos y tierras desnudas	AR-TD	2 081.43	12.51	2 189.43	13.16	2 175.57	13.08	2 194.29	13.19	108	-13.86	18.72
7	Glaciares	GLA	273.15	1.64	233.01	1.4	224.73	1.35	182.34	1.1	-40.14	-8.28	-42.39
8	Turberas y bofedales	BOF	293.85	1.77	293.13	1.76	287.91	1.73	254.52	1.53	-0.72	-5.22	-33.39
9	Cuerpos de agua	AGU	71.37	0.43	54.27	0.33	62.37	0.37	51.75	0.31	-17.1	8.1	-10.62

Fuente. Elaboración propia.
Nota: Las celdas plomas significan ganancias para la categoría

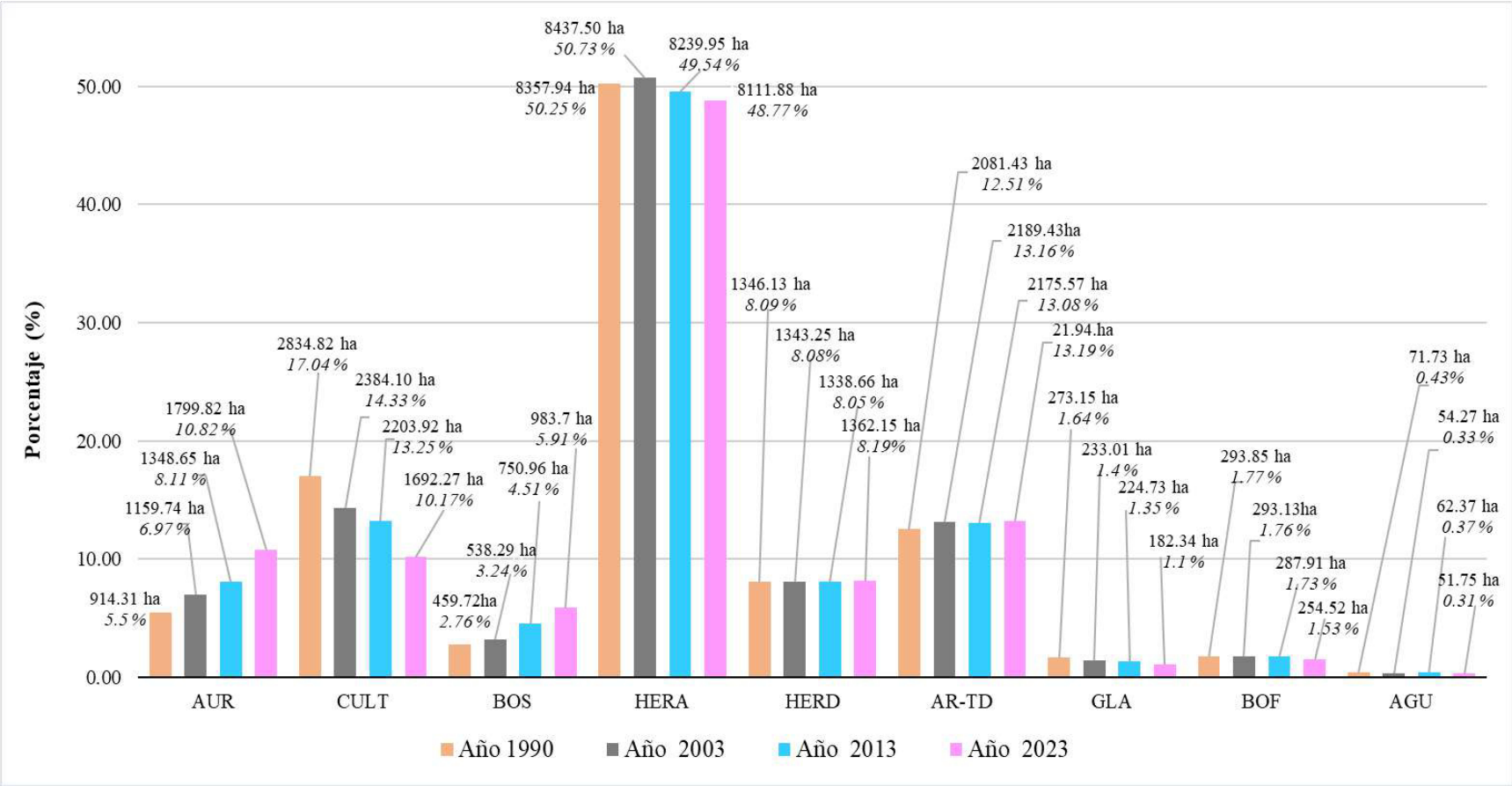


Figura 101. Superficie porcentual de cobertura y uso de suelo para el periodo 1990-2023
Fuente. Elaboración propia.

5.2.3.3 Patrones de transición para los periodos 1990-2003, 2003-2013 y 2013-2023.

En el periodo de 1990-2003 (ver Figura 102), las 3 transiciones que dominaron la dinámica en el distrito corresponden a la conversión de áreas agrícolas heterogéneas (CULT) hacia áreas urbanizadas (AUR), herbazal abierto (HERA) y bosque (BOS) que suman cerca de 600 ha. Aunque, simultáneamente esta categoría ganó casi 180 ha del herbazal abierto (HERA) y bosque (BOS) que se ubicaban en áreas cercanas a los centros poblados de Ancalayo, Paccha, Cochas Grande, Cullpa Alta, Cullpa Baja, La cantuta, Incho; y los lugares turísticos de Bosque Dorado, Bosque 7 Leyendas y Bosque de los Pinos (ver Figura 103).

Estos patrones de transición evidencian que las áreas urbanizadas se han expandido solo sobre áreas agrícolas heterogéneas (CULT). Además, la conversión de áreas agrícolas heterogéneas (CULT) hacia herbazal abierto (HERA) o afloramientos rocosos y tierras desnudas (AR-TD) podría indicar un proceso de abandono o degradación permanente de 292.41 ha. A nivel espacial (ver Figura 103), se observa que el crecimiento urbano se dio principalmente sobre las áreas agrícolas heterogéneas (CULT) ubicadas en altitudes bajas del distrito y en áreas colindantes al casco urbano existente. Mientras que su transformación a herbazal abierto (HERA) o bosque (BOS) se dio en áreas más alejadas al casco urbano.

En el periodo 2003-2013 (ver Figura 102) se observa que 2 de las 3 principales transiciones fueron diferentes respecto al intervalo anterior, predominó la conversión de herbazal abierto (HERA) en bosque (BOS) o áreas agrícolas heterogéneas (CULT). La expansión urbana fue significativa; sin embargo, no solo se dio sobre áreas agrícolas heterogéneas (157.59 ha); sino que se aprovecharon 27.27 ha de afloramientos rocosos y tierras desnudas (AR- TD).

La conversión de las áreas agrícolas heterogéneas a herbazal abierto (HERA) y a bosque (BOS) se redujo drásticamente respecto al periodo anterior, lo que podría sugerir un aprovechamiento agrícola continuo de estas áreas.

A nivel espacial (ver Figura 104), la conversión de herbazal abierto (HERA) a bosque (BOS) o áreas agrícolas heterogéneas (CULT) se dió en zonas colindantes al “Bosque Dorado”, “Bosque 7 Leyendas”, “Bosque de los Pinos” y el límite distrital. La

transición de herbazal abierto (HERA) hacia áreas agrícolas heterogéneas (CULT) principalmente dio en zonas colindantes al centro poblado Cochas Grande y el "Mirador Cruz de Paz". En el caso de la expansión urbana, continuó creciendo en áreas cercanas al casco urbano.

En el periodo 2013-2023 (ver Figura 102), se observa la mayor presión de la expansión urbana sobre las áreas agrícolas heterogéneas (CULT) que se redujo en 391.23 ha. Además, destaca el incremento del bosque (BOS) a costa de 396.81 ha de herbazal abierto (HERA) y áreas agrícolas heterogéneas.

A nivel espacial (ver Figura 105), la transformación de áreas agrícolas heterogéneas (CULT) en áreas urbanizadas (AUR) no solo se limitó a áreas colindantes del casco urbano, sino que se observó un crecimiento descentralizado en los diferentes centros poblados. Al igual que el periodo anterior, la conversión de herbazal abierto (HERA) a bosque (BOS) se dio en los lugares turísticos y en el límite con el distrito de Huancayo. Por otro lado, la transición de áreas agrícolas heterogéneas a herbazal abierto y a bosque se dio en la parte alta del centro poblado de Ancalayo y Cochas Grande.

En los 3 periodos, el herbazal denso (HERD) ganó o perdió superficie a costa del herbazal abierto (HERA) o turberas y bofedales (BOF). Los glaciares (GLA) cambiaron únicamente a costa de los afloramientos rocosos y tierras desnudas (AR-TD). Por último, los cuerpos de agua ganaron o perdieron superficie principalmente a costa de los afloramientos rocosos y tierras desnudas (AR- TD). Estas categorías se extienden mayormente en la parte alta del distrito por lo que no tienen influencia antrópica directa, en consecuencia, su transición está limitada a las categorías espacialmente colindantes.

Las transiciones registradas en los 3 periodos de evaluación en las áreas con algún valor social, ambiental y/o histórico (áreas restrictivas), se concentran principalmente entre las categorías de áreas agrícolas heterogéneas (CULT), herbazal abierto (HERA) y bosque (BOS). Sin embargo, en los intervalos de 1990-2003 y 2013-2023 se observa la transformación hacia áreas urbanizadas en parte de la Zona de Protección Ecológica y en la Zona de Conservación Paisajística (ver Figura 103, Figura 104 y Figura 105).

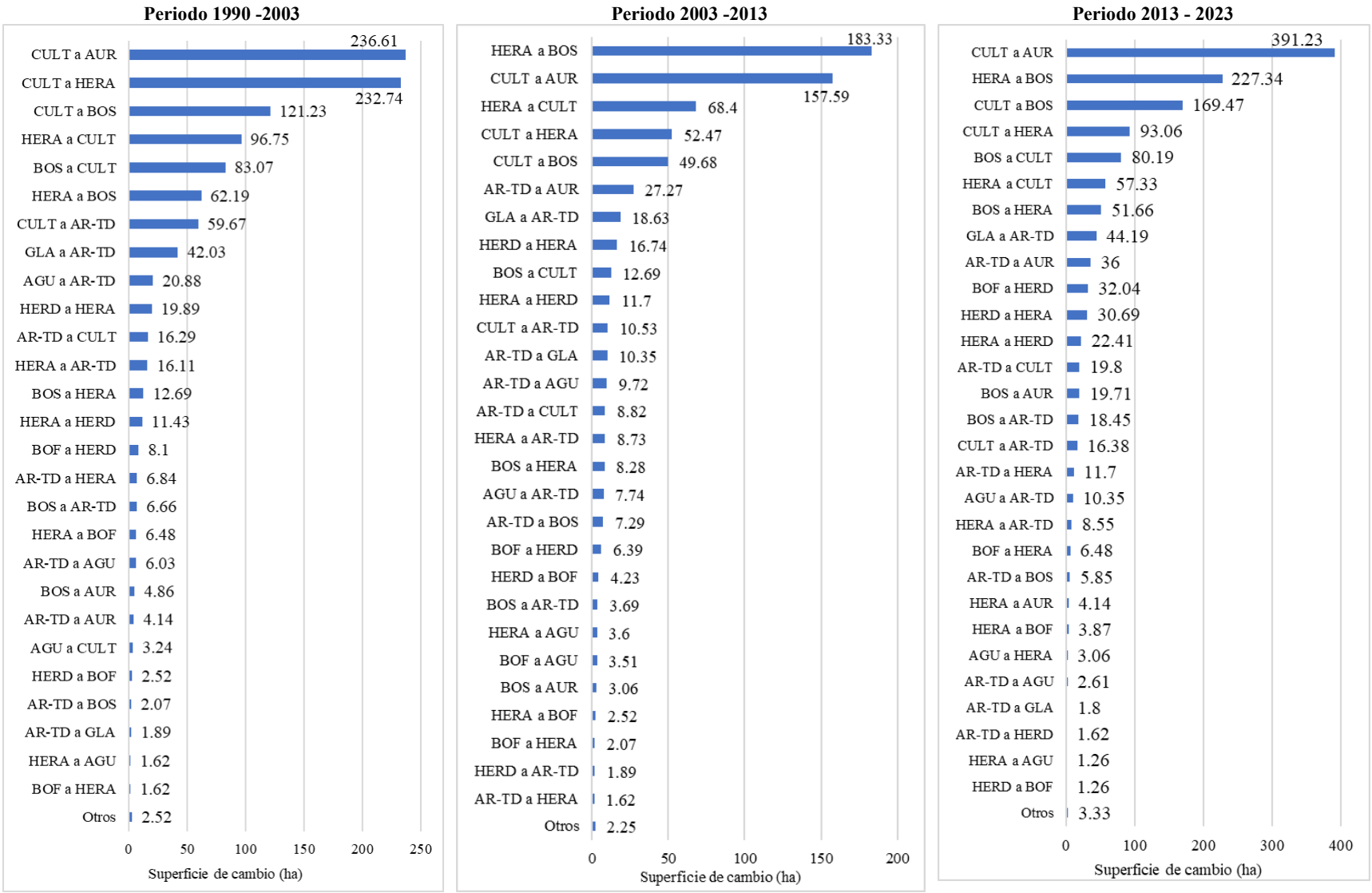


Figura 102. Transiciones de cobertura y uso de suelo para los periodos 1990-2003, 2003-2013 y 2013-2023
Fuente. Elaboración propia.

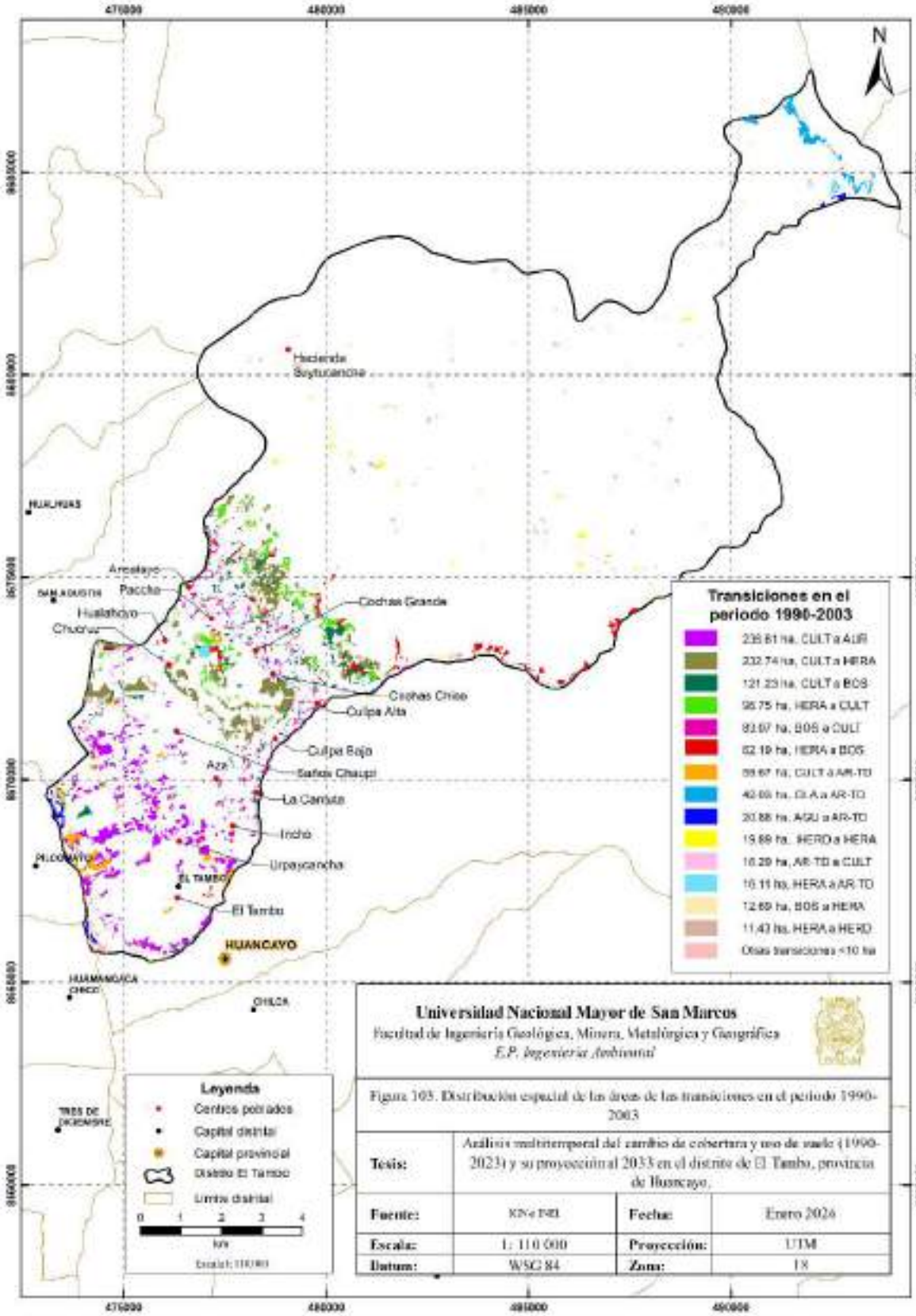


Figura 103. Distribución espacial de las áreas de las transiciones para el periodo 1990-2003
Fuente. Elaboración propia

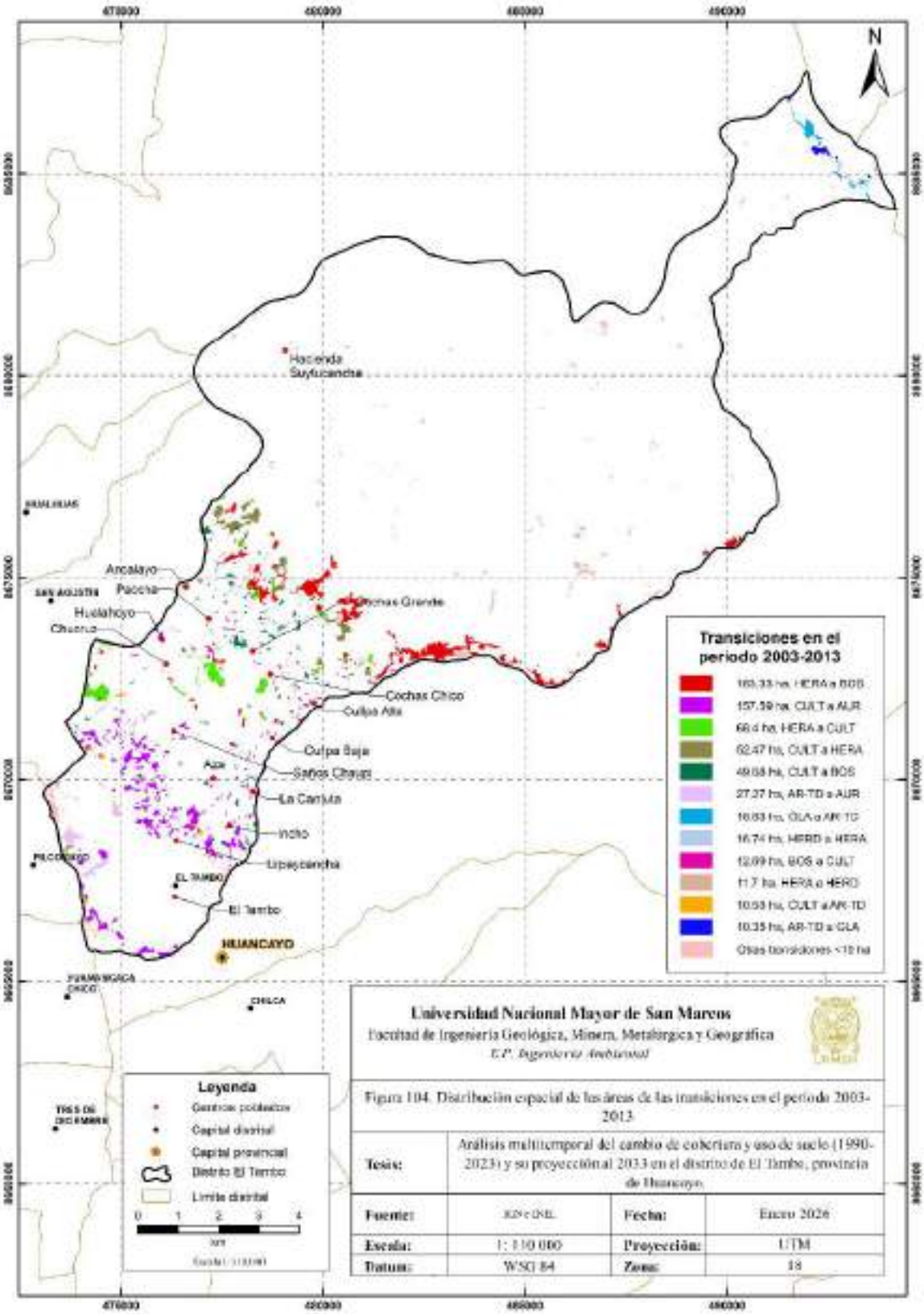


Figura 104. Distribución espacial de las áreas de las transiciones para el periodo 2003-2013
Fuente. Elaboración propia

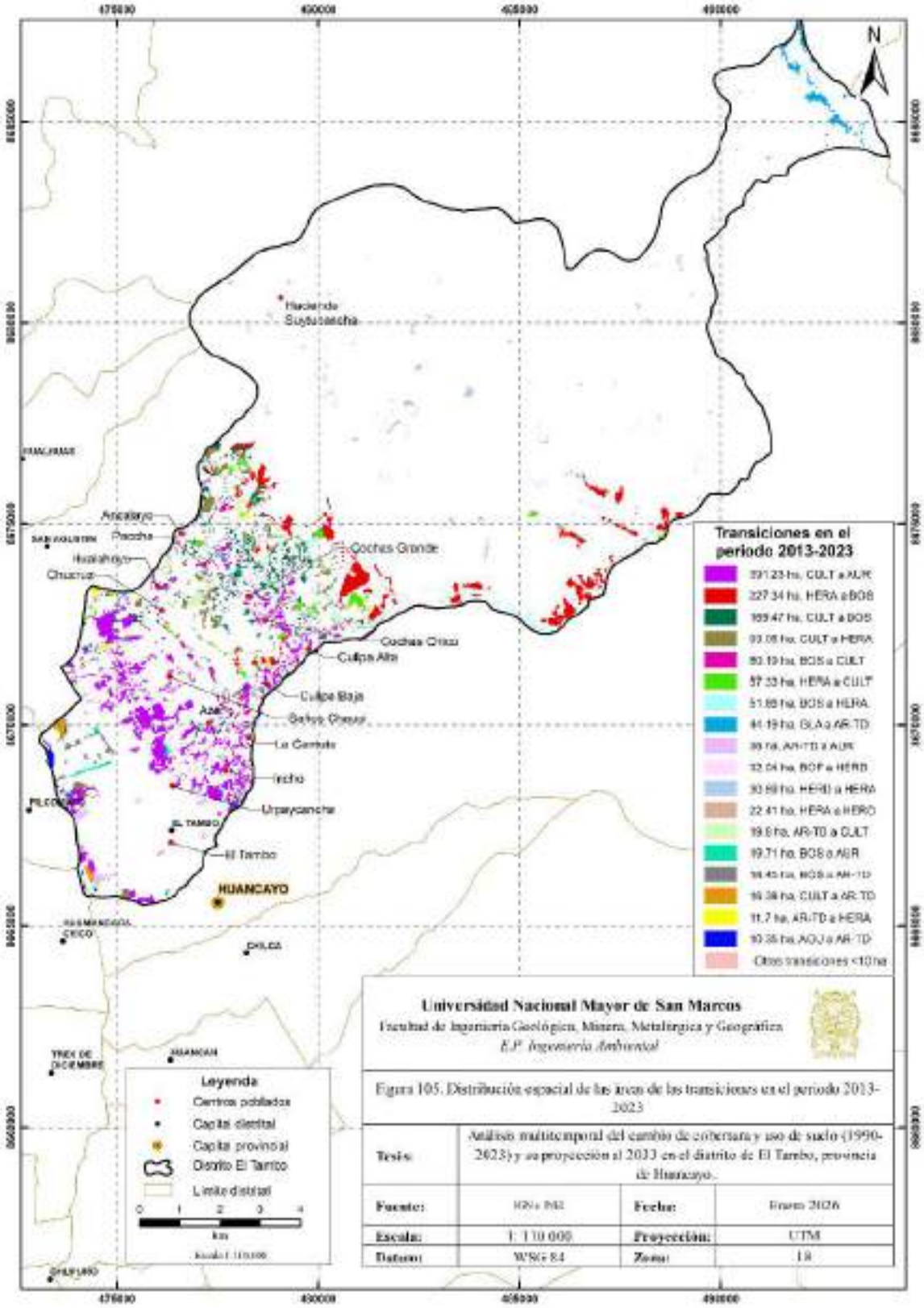


Figura 105. Distribución espacial de las áreas de las transiciones para el periodo 2013-2023
Fuente. Elaboración propia

5.2.3.4 Intensidad del cambio - Nivel de transición

El nivel de transición permitió analizar la intensidad de las transiciones de una categoría a otra considerando el tamaño de todas las categorías de forma individual, se identificó cuáles fueron las categorías que evitaron o se dirigieron hacia la categoría final; además se evaluó el nivel de intensidad de transformación en base al área disponible de cada categoría.

En la Figura 106, Figura 107, Figura 108, Figura 109 y Figura 110 el eje vertical "y" de los gráficos representa a las categorías que ceden su superficie, el eje "x" mide el porcentaje de cada categoría que se transforma y la línea roja discontinua es la intensidad uniforme. Las categorías con valores menores a la intensidad uniforme se consideran como categorías que evitan transformarse a la categoría final, caso contrario, son categorías con mayor tendencia a convertirse en la categoría final y que tienen mayor presión de transformación.

Para los 3 periodos de evaluación, se observa que las áreas urbanizadas (AUR) ganaron superficie de forma más intensa que las áreas agrícolas heterogéneas (CULT) (ver Figura 106). Esto muestra la alta presión que se ejerce sobre áreas productivas ubicadas en la parte baja del distrito.

Las áreas agrícolas heterogéneas (CULT) en los 3 periodos ganaron superficie de forma más intensa que el bosque (BOS) respecto a las otras categorías como herbazal abierto (HERA).

El bosque (BOS) en los 3 periodos de evaluación ganó superficie de forma más intensa principalmente de las áreas agrícolas heterogéneas (CULT) y en los 2 últimos periodos, también del herbazal abierto (HERA) (ver Figura 107).

El herbazal abierto (HERA), en el periodo 1990 -2003 ganó superficie de forma más intensa de las áreas agrícolas heterogéneas (CULT); sin embargo, en los otros intervalos hubo una mayor dinámica ya que se agregaron más categorías que tuvieron mayor tendencia en transformarse (ver Figura 107).

El herbazal denso (HERD) en los 3 periodos ganó superficie de forma más intensa de la categoría de turberas y bofedales (BOF), y en los últimos intervalos también los cuerpos de agua tuvieron mayor tendencia a convertirse (ver Figura 108).

Los afloramientos rocosos y tierras desnudas (AR-TD) en los dos primeros intervalos, los cuerpos de agua (AGU) cedieron superficie de forma más intensa; sin embargo, en el periodo 2013 -2023 los glaciares tuvieron también cedieron superficie de forma más intensa (ver Figura 108),

Respecto a los glaciares (GLA) en todos los periodos, solo la categoría de afloramientos rocosos y tierras (AR-TD) desnudas cedió superficie de forma más intensa (ver Figura 109).

Respecto a las turberas y bofedales (BOF) en el primer periodo los cuerpos de agua (AGU) tuvieron mayor tendencia en convertirse a esta categoría; sin embargo, en los otros periodos el herbazal denso (HERD) también cedió superficie de forma más intensa (ver Figura 110).

Respecto a los cuerpos de agua (AGU) en el primer y último periodo la categoría de afloramientos rocosos y tierras desnudas (AR – TD) cedió superficie de forma más intensa; a diferencia del segundo periodo donde las turberas y bofedales cedieron superficie con mayor intensidad (ver Figura 110).

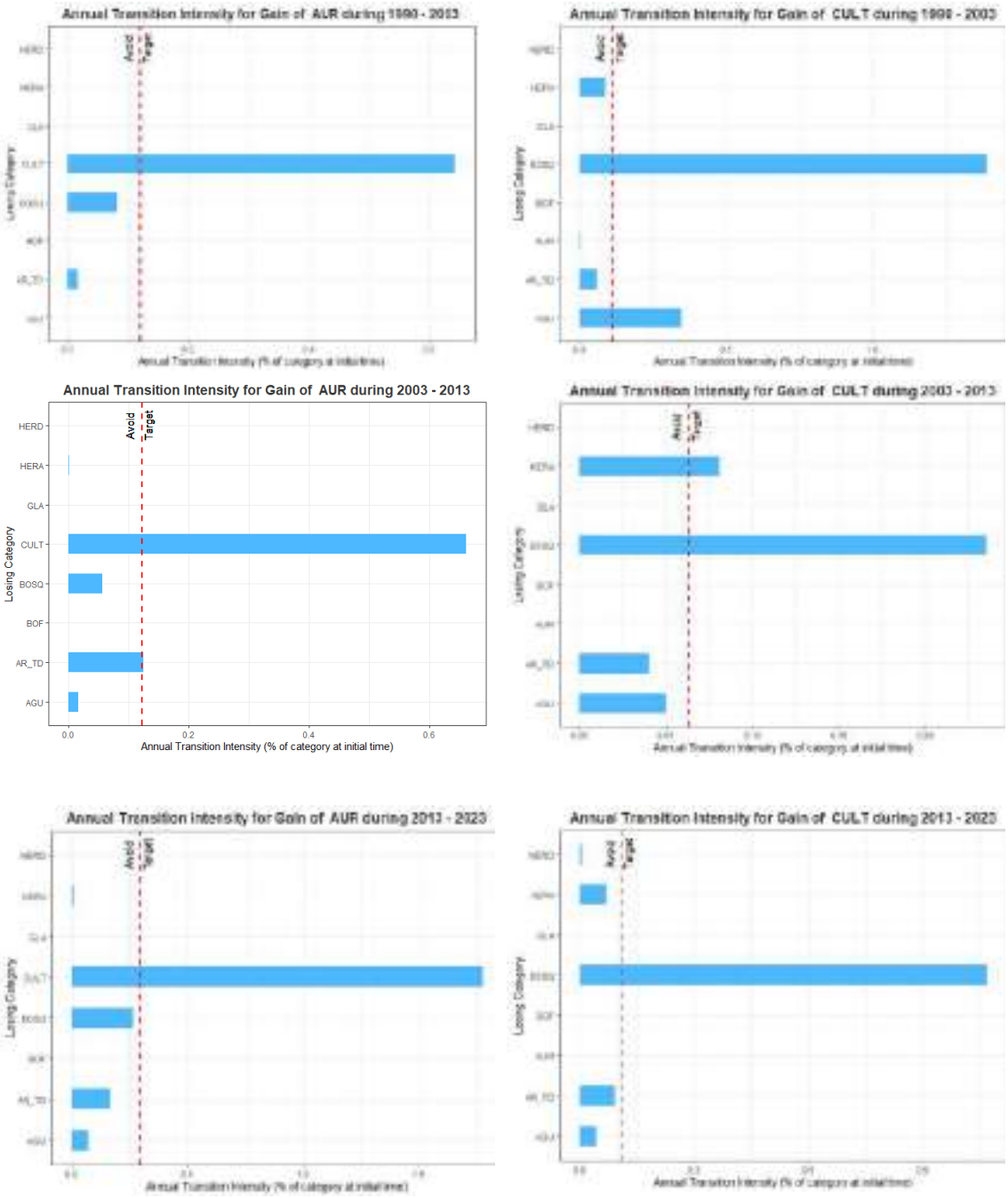


Figura 106. Intensidad del cambio - Nivel de transición (Áreas urbanizadas y áreas agrícolas heterogéneas)

Fuente. Elaboración propia.

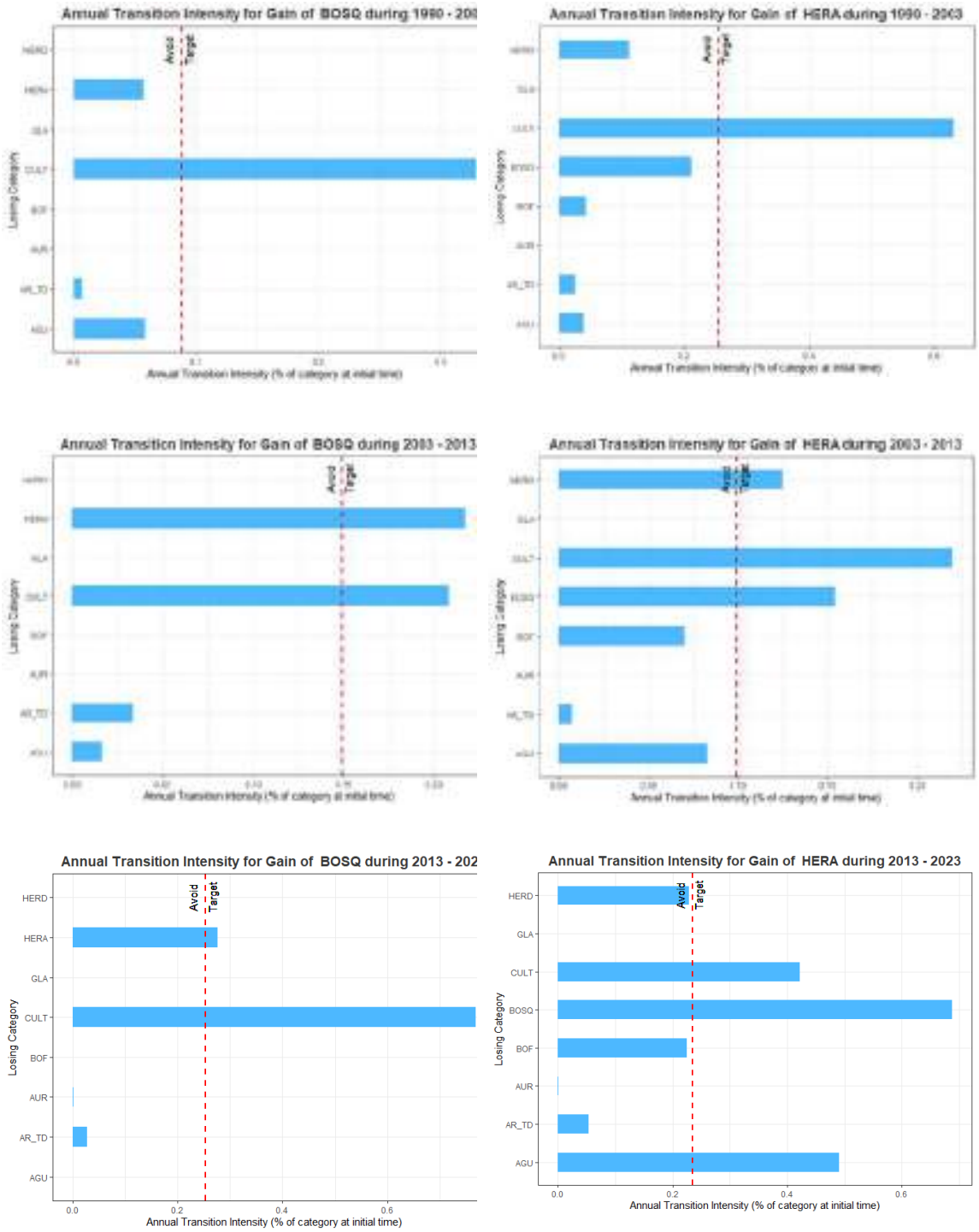


Figura 107. Intensidad del cambio - Nivel de transición (Bosque y herbazal abierto)

Fuente. Elaboración propia.

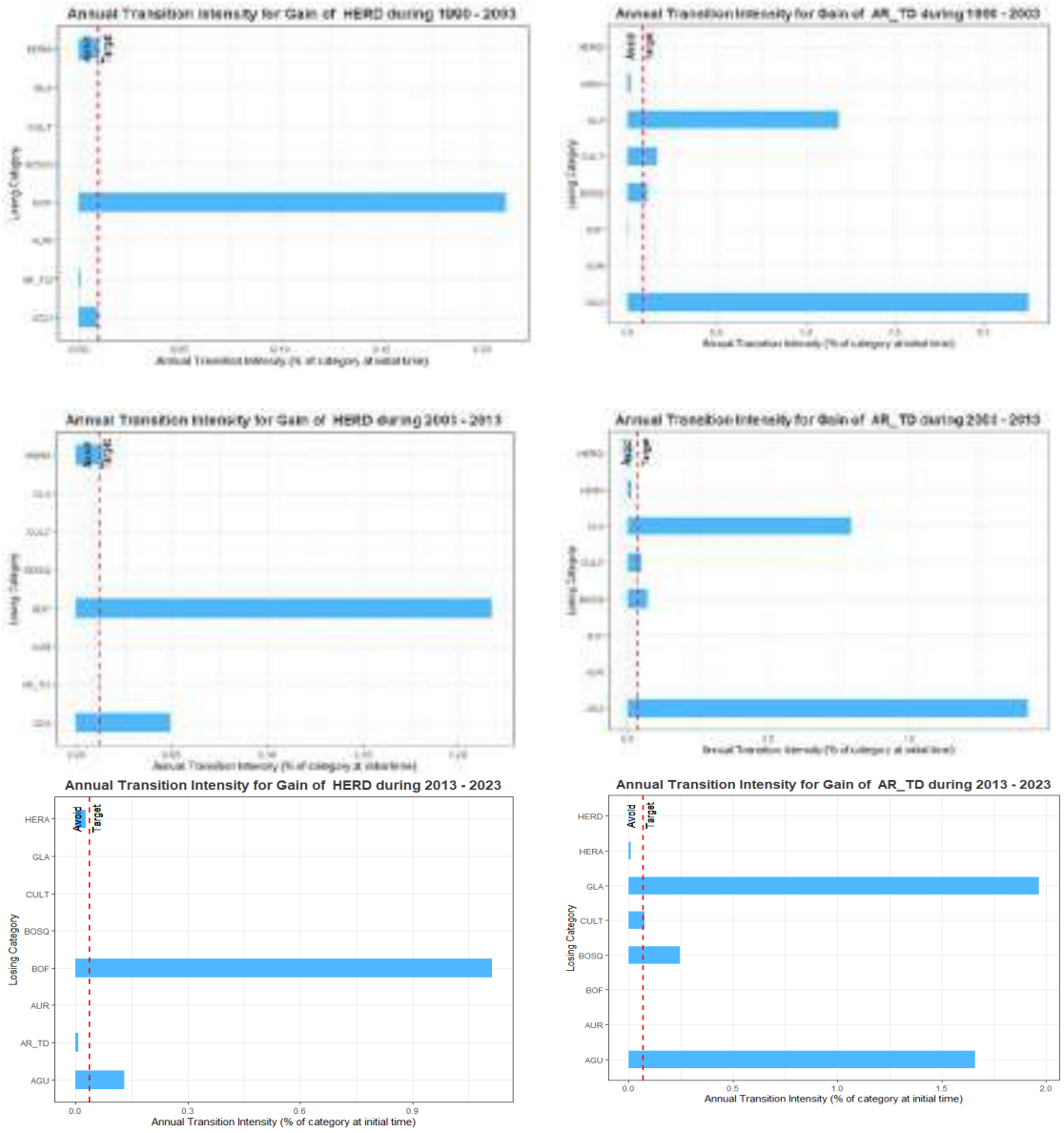


Figura 108. Intensidad del cambio - Nivel de transición (Herbazal denso; y afloramientos rocosos y tierras desnudas)

Fuente. Elaboración propia.

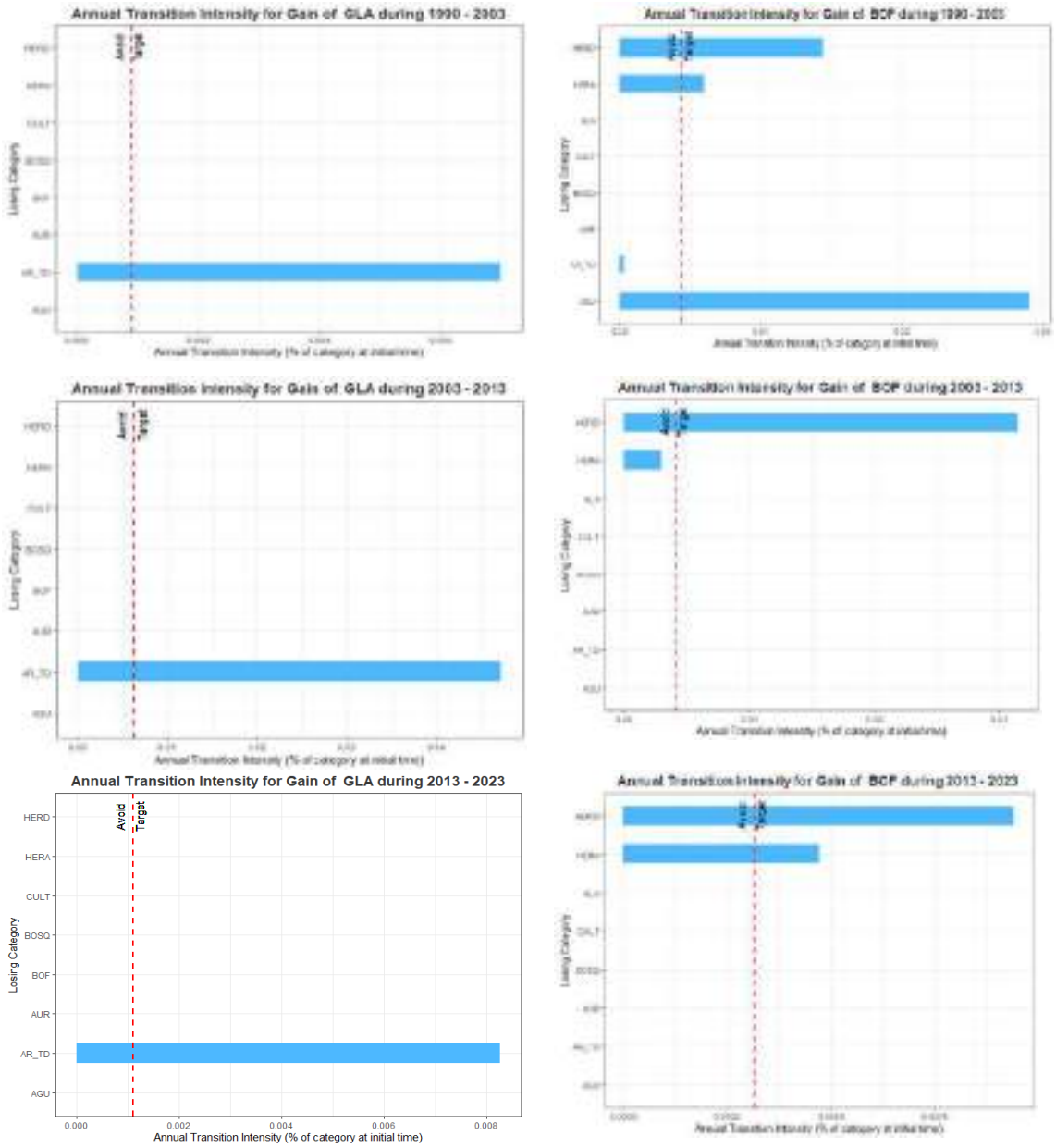


Figura 109. Intensidad del cambio - Nivel de transición (Glaciares, turberas y bofedales)
Fuente. Elaboración propia.

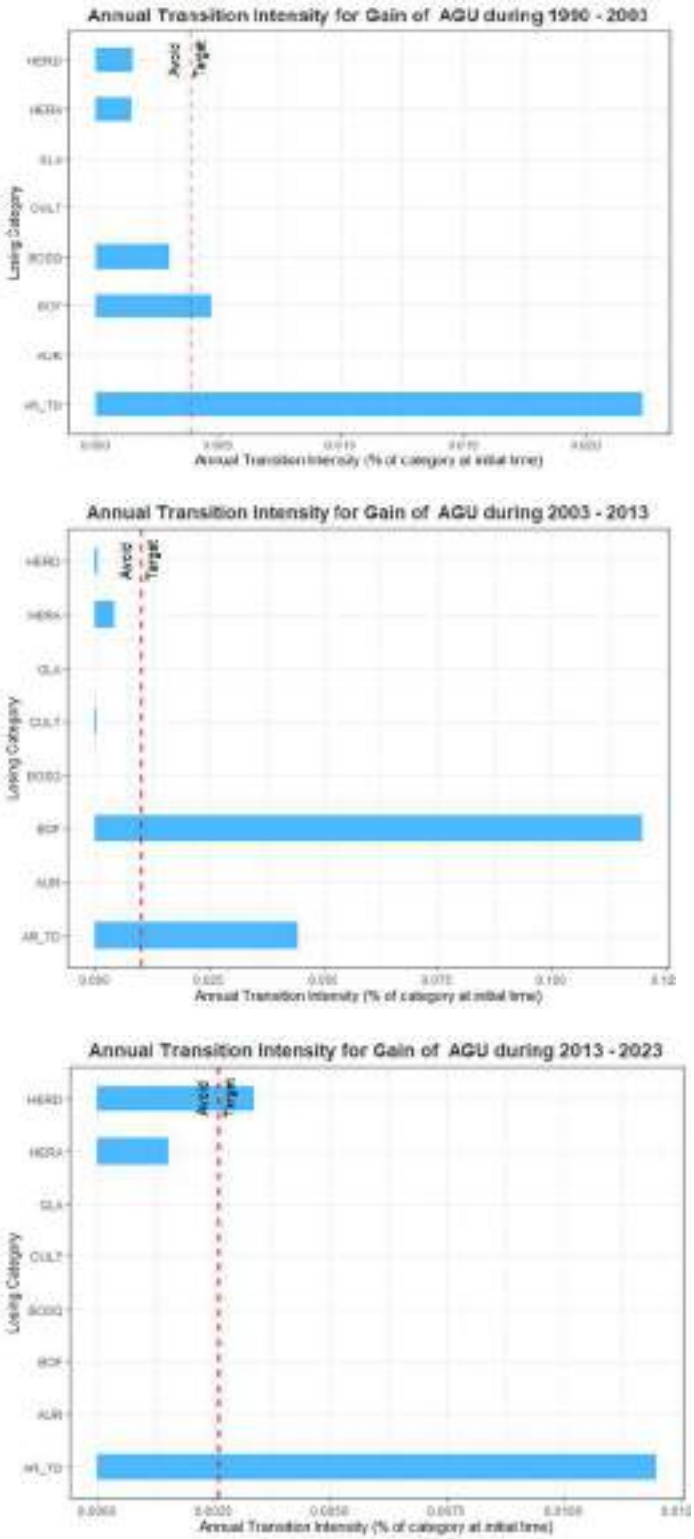


Figura 110. Intensidad del cambio - Nivel de transición (Cuerpos de agua)
Fuente. Elaboración propia

5.3 Objetivo N°3: Proyección de la cobertura y uso de suelo al año 2033

5.3.1 Evaluación de la influencia de los impulsores de cambio

Se midió la influencia de los impulsores o variables en la dinámica del cambio de cobertura y uso mediante el coeficiente V-Cramer. Tal como se observa en la Tabla 47 los resultados indicaron una influencia significativa de las variables con la mayoría de las categorías a excepción de las turberas y bofedales (BOF) y cuerpos de agua (AGU) con los que tuvieron valores menores a 0.15 lo cual se explicaría por la lejanía de estas categorías EL Modelo Digital de Elevación (DEM) y habilitaciones urbanas fueron las más significativas (valores mayores a 0.44) lo que sugiere que las dinámica del cambios estarían restringidas principalmente por la altitud e influenciadas por las habilitaciones urbanas.

Tabla 47. Resultados de los valores V-Cramer de los impulsores de cambio

Descripción	Modelo Digital de Elevación (DEM)	Pendiente	Distancia a vías principales	Distancia a vías secundarias	Distancia a red hídrica	Distancia a centros poblados considerados en el INEI	Distancia a Fuentes de agua	Distancia a derechos de uso de agua - uso agrario	Distancia a derechos de uso de agua - uso poblacional	Habilitaciones urbanas
V-Cramer general	**0.44**	**0.00**	**0.29**	**0.37**	**0.19**	**0.42**	**0.40**	**0.44**	**0.41**	**0.47**
1*	0.55	0.00	0.45	0.32	0.35	0.44	0.38	0.41	0.46	0.56
2*	0.53	0.00	0.40	0.33	0.22	0.51	0.43	0.53	0.41	0.55
3*	0.27	0.00	0.23	0.17	0.06	0.20	0.34	0.26	0.26	0.29
4*	0.57	0.00	0.37	0.30	0.25	0.43	0.36	0.49	0.47	0.59
5*	0.21	0.00	0.30	0.20	0.15	0.25	0.26	0.31	0.27	0.28
6*	0.41	0.00	0.30	0.46	0.14	0.47	0.49	0.52	0.48	0.53
7*	0.77	0.00	0.20	0.77	0.26	0.77	0.70	0.78	0.71	0.78
8*	0.08	0.00	0.08	0.10	0.08	0.08	0.11	0.10	0.12	0.12
9*	0.11	0.00	0.06	0.12	0.07	0.11	0.13	0.12	0.13	0.14

Nota: (*) 1: áreas urbanizadas, 2: áreas agrícolas heterogéneas, 3: Bosque, 4: herbazal abierto, 5: herbazal denso, 6: afloramientos rocosos y tierras desnudas, 7: glaciares, 8: turberas y bofedales y 9: cuerpos de agua.
Fuente. Elaboración propia.

5.3.2 Probabilidad del cambio de cobertura y uso de suelo al año 2033

En la Tabla 48 se presenta la matriz de probabilidad de cambio (Matriz de Markov) que muestra las probabilidades de cambio al año 2033. La diagonal es el porcentaje que no presenta cambios, es decir, indica la permanencia de cada categoría para el año proyectado. Los resultados por fuera de la diagonal corresponden a la probabilidad de cambio del año 2023 (filas) al 2033 (columnas). Los resultados que tienen una alta probabilidad de cambio (>10 %) corresponden a la transformación hacia áreas urbanizadas, áreas agrícolas heterogéneas; y afloramientos rocosos y tierras desnudas.

Tabla 48. Matriz de probabilidad de cambio – Matriz de Markov

				Año 2033								
	Número	**Descripción**	**Código**	**AUR**	**CULT**	**BOS**	**HERA**	**HERD**	**AR-TD**	**GLA**	**BOF**	**AGU**
Año 2023	1	Áreas urbanizadas	**AUR**	99.90	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	2	Áreas agrícolas heterogéneas	**CULT**	13.76	75.63	6.50	3.93	0.00	0.15	0.00	0.02	0.00
	3	Bosque	**BOS**	0.00	12.30	85.79	0.00	0.00	1.91	0.00	0.00	0.00
	4	Herbazal abierto	**HERA**	0.00	0.11	1.83	97.79	0.08	0.15	0.00	0.02	0.02
	5	Herbazal denso	**HERD**	0.00	0.03	0.00	0.92	98.92	0.02	0.00	0.09	0.01
	6	Afloramientos rocosos y tierras desnudas	**AR-TD**	0.29	0.59	0.02	0.24	0.01	98.75	0.01	0.00	0.09
	7	Glaciares	**GLA**	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	13.95	86.05	0.00	0.00
	8	Turberas y bofedales	**BOF**	0.01	0.00	0.03	0.50	4.51	0.00	0.00	94.30	0.65
	9	Cuerpos de agua	**AGU**	0.00	6.24	0.31	0.14	0.34	15.89	0.00	0.00	77.08

Fuente. Elaboración propia.

5.3.3 Escenarios proyectados al 2033

5.3.3.1 Escenario tendencial al 2033.

En términos de superficie, según la Tabla 49 y Figura 111, se proyecta el incremento de 857.79 ha de áreas urbanizadas (AUR), lo que representa casi el 73.96 % de su área en 2023. En el caso del bosque (BOS) se proyecta el incremento de 700.29 ha,

duplicando prácticamente el área del 2023. Respecto al herbazal abierto (HERA); y afloramientos rocosos y tierras desnudas (AR-TD) se prevé incrementos menores a 30 ha.

En contraste, las áreas agrícolas heterogéneas perderían 1 079.82 ha, lo que equivale casi la mitad de su área inicial. El herbazal abierto perderá 410.22 ha, correspondiente al 5 % de su área inicial. Los glaciares perderán 72.18 ha, lo que significa casi el 30 % de su área inicial. Finalmente, las tuberas y bofedales (BOF) y cuerpos de agua (AGU) tendrán perdidas menores a 40 ha.

A nivel espacial, tal como se observa en la Figura 112, este escenario proyecta la expansión de las áreas urbanizadas sobre áreas agrícolas heterogéneas colindantes al casco urbano, llegando consolidar al centro poblado Incho como parte de este. Además, en la parte alta de los centros poblados de Ancalayo, Paccha, Cullpa Alta y en zonas circundantes al Bosque Dorado se prevé la conversión de áreas agrícolas heterogéneas y herbazal abierto en bosque. Al igual que en los patrones observados en periodos anteriores, se proyecta la transformación de glaciares en afloramientos rocosos y tierras desnudas.

5.3.3.2 Mapas restrictivos al 2033.

Los mapas restrictivos parten del supuesto donde exista restricción de las transiciones en las áreas con algún tipo de valor social, ambiental y/o histórico. El primer mapa restrictivo considera un escenario donde no se permita ninguna transformación; mientras que en el segundo solo se podría permitir la conversión hacia áreas agrícolas heterogéneas y/o bosque.

Tal como se observa en la Figura 113 y Figura 114, los escenarios restrictivos al igual que el escenario tendencial proyectan la conversión similar de las áreas urbanizadas a nivel espacial y cuantitativo, a excepción de la Zona de Protección Ecológica donde ya no se transformaría en áreas urbanizadas. En las Zonas de Conservación Paisajística, en el segundo escenario restrictivo y en el escenario tendencial se observa la conversión de herbazal abierto (HERA) a bosque (BOS).

En términos cuantitativos, casi todas las categorías en los 3 escenarios prevén la misma superficie a excepción de las áreas urbanizadas (AUR), áreas agrícolas heterogéneas (CULT) y bosque (BOS) que difieren en menos de 0.5 ha (ver Tabla 49).

Estos resultados muestran que tanto en un escenario tendencial o restrictivo, se proyecta el crecimiento de las áreas urbanizadas. No obstante, debido a la lejanía de las áreas restrictivas estas aún no se verán afectadas en el 2033, a excepción de la Zonas de Protección Ecológica próxima al casco urbano y que ya evidencia ciertos procesos de transformación. Asimismo, en los escenarios restrictivos se observa la reducción de las transiciones dentro de estas áreas de interés.

Tabla 49. Superficie de cobertura y uso de suelo en los escenarios proyectados al 2033

Descripción	Año 2023		Escenario tendencial		Escenario restrictivo 1		Escenario restrictivo 2		Ganancias o pérdidas brutas		
	Área (ha)	Porcentaje (%)	Área (ha)	Porcentaje (%)	Área (ha)	Porcentaje (%)	Área (ha)	Porcentaje (%)	Año 2033 - escenario tendencial	Año 2033 - escenario restrictivo 1	Año 2033 - escenario restrictivo 2
Áreas urbanizadas (AUR)	1 159.74	6.97	2 017.53	12.13	2 018.07	12.13	2 018.07	12.13	857.79	858.33	858.33
Áreas agrícolas heterogéneas (CULT)	2 384.10	14.33	1 304.28	7.84	1 303.83	7.84	1 303.74	7.84	-1 079.82	-1 080.27	-1 080.36
Bosque (BOS)	538.29	3.24	1 238.58	7.45	1 238.22	7.44	1 238.58	7.45	700.29	699.93	700.29
Herbazal abierto (HERA)	8 437.50	50.73	8 027.28	48.26	8 027.55	48.26	8 027.28	48.26	-410.22	-409.95	-410.22
Herbazal denso (HERD)	1 343.25	8.08	1 362.15	8.19	1 362.15	8.19	1 362.15	8.19	18.90	18.90	18.90
Afloramientos rocosos y tierras desnudas (AR-TD)	2 189.43	13.16	2 215.80	13.32	2 215.80	13.32	2 215.80	13.32	26.37	26.37	26.37
Glaciares (GLA)	233.01	1.40	160.83	0.97	160.83	0.97	160.83	0.97	-72.18	-72.18	-72.18
Turberas y bofedales (BOF)	293.13	1.76	254.52	1.53	254.52	1.53	254.52	1.53	-38.61	-38.61	-38.61
Cuerpos de agua (AGU)	54.27	0.33	51.75	0.31	51.75	0.31	51.75	0.31	-2.52	-2.52	-2.52
Total	**16 632.72**	**100.00**	**16 632.72**	**100.00**	**16 632.72**	**100.00**	**16 632.72**	**100.00**			

Fuente. Elaboración propia.

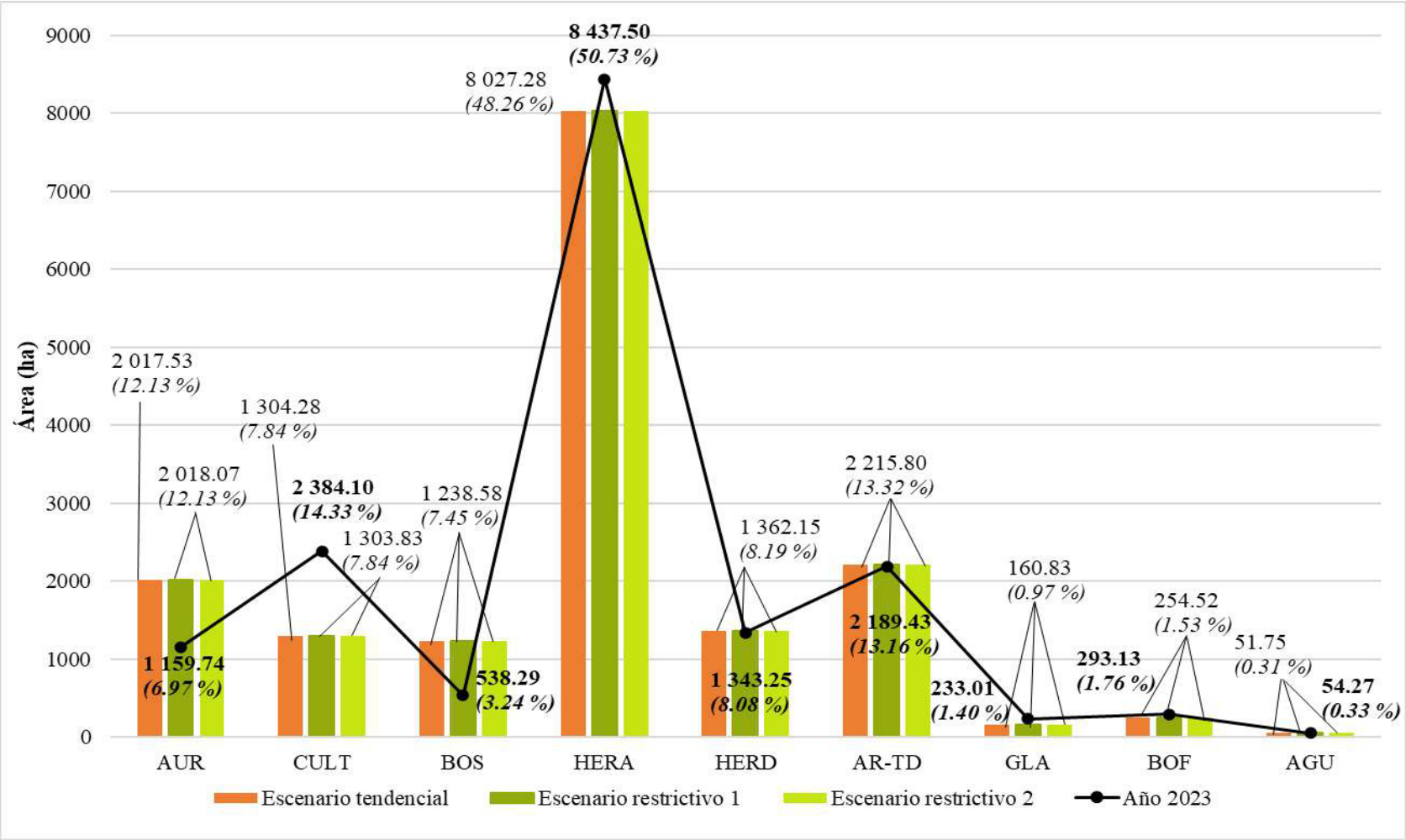


Figura 111. Superficie de cobertura y uso de suelo en escenarios proyectados al 2033
Fuente. Elaboración propia.

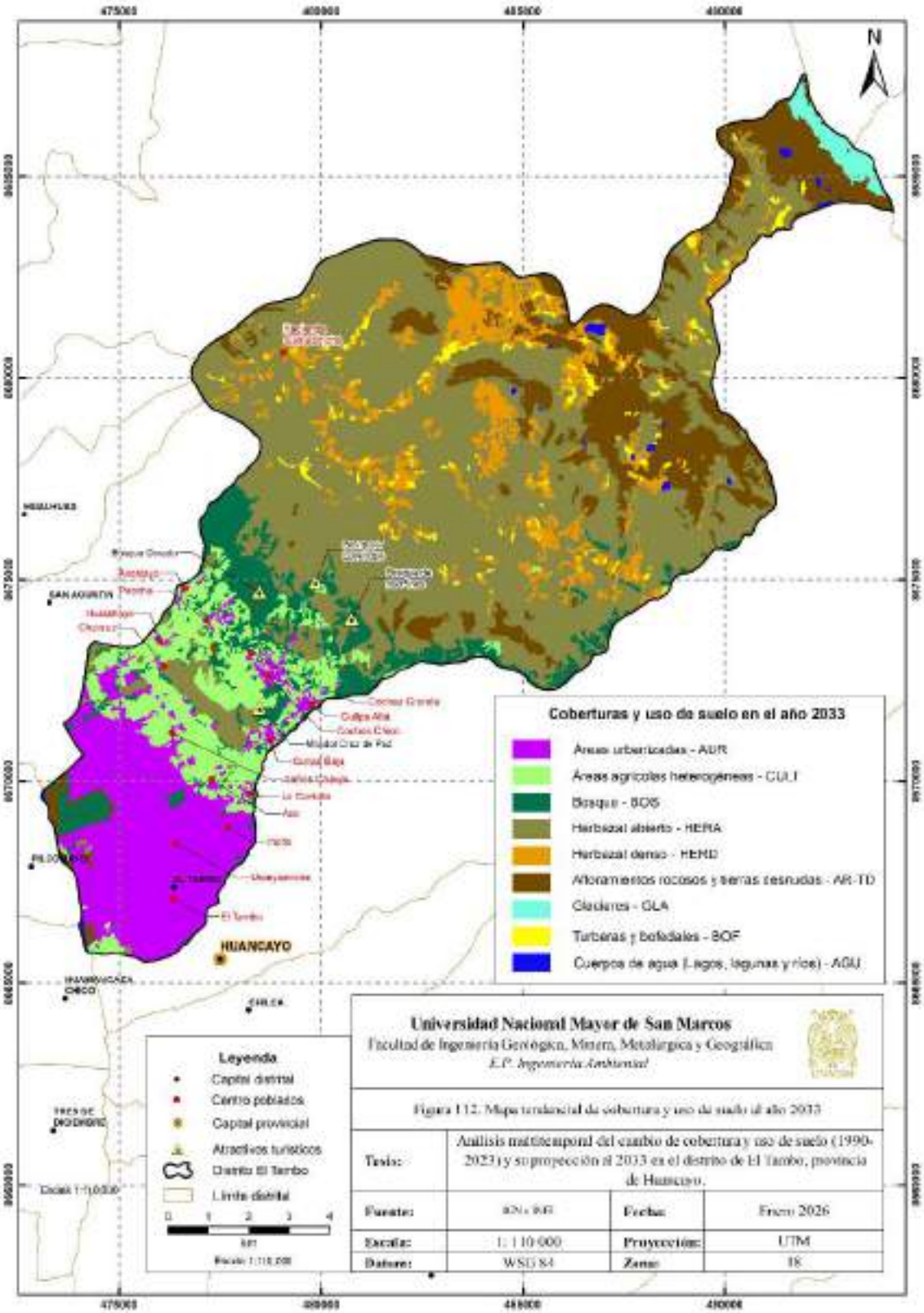


Figura 112. Mapa tendencial de cobertura y uso de suelo al año 2033
Fuente. Elaboración propia.

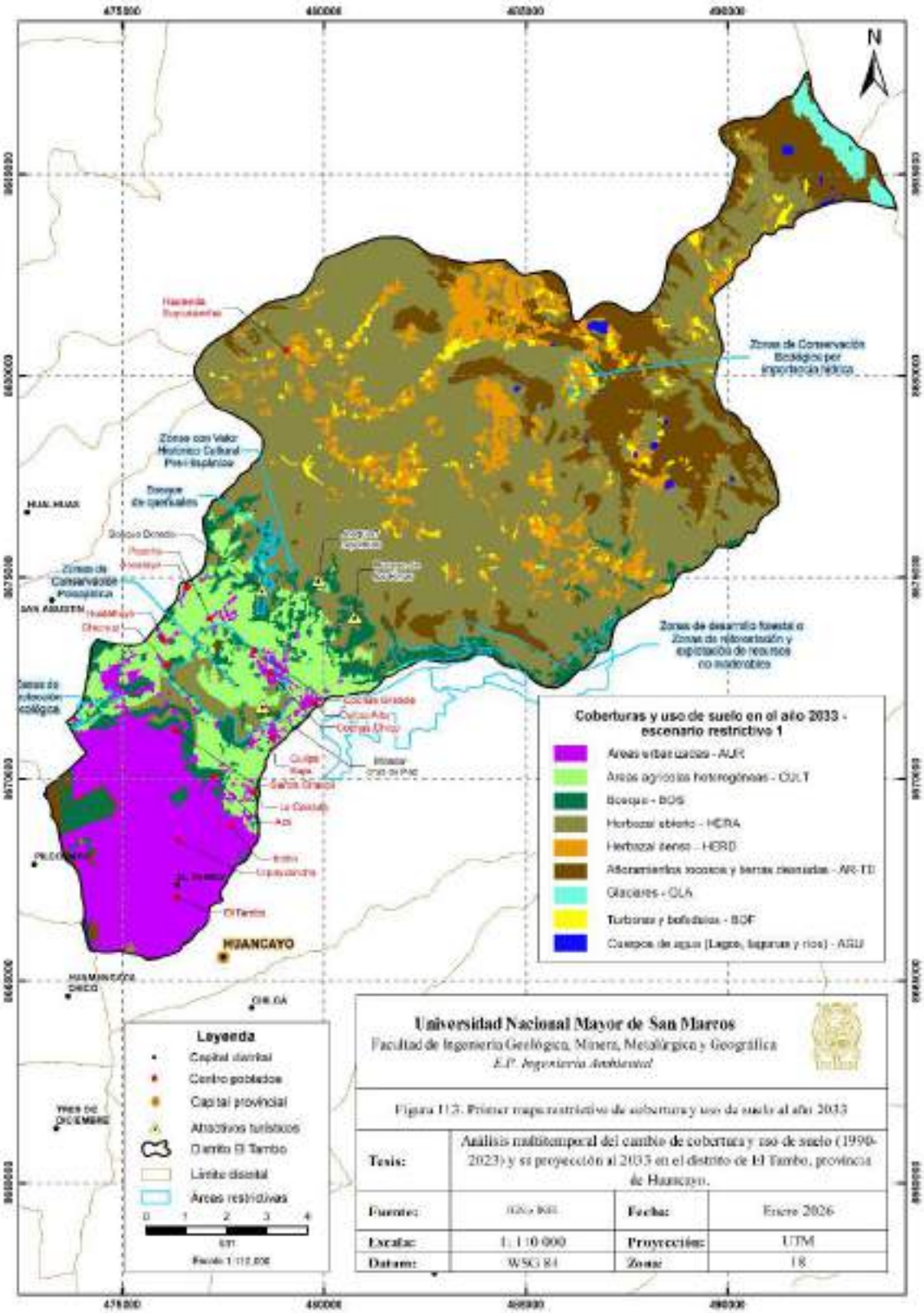


Figura 113. Primer mapa restrictivo de cobertura y uso de suelo al año 2033
Fuente. Elaboración propia.

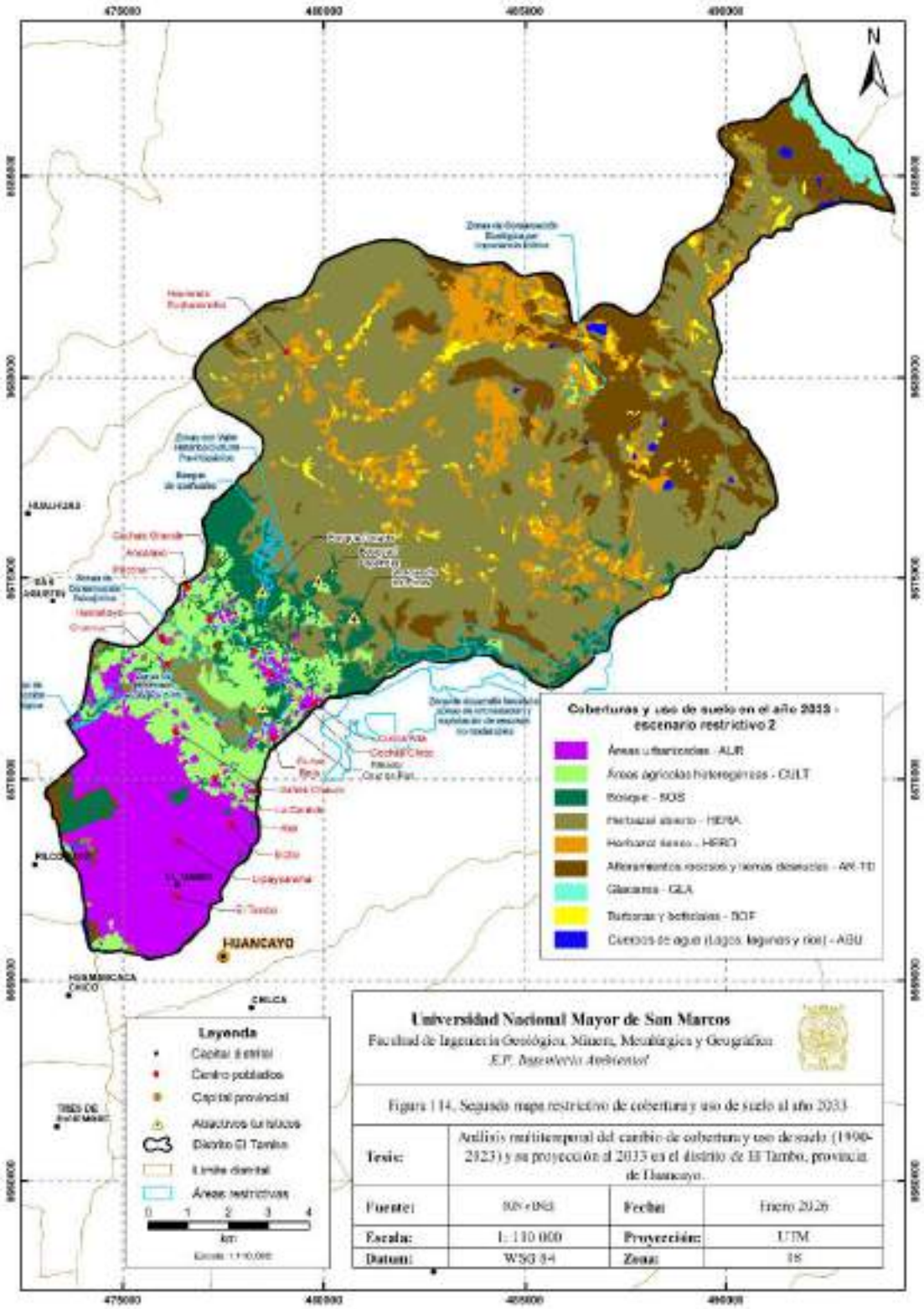


Figura 114. Segundo mapa restrictivo de cobertura y uso de suelo al año 2033
Fuente. Elaboración propia.

5.3.3.3 Análisis de incertidumbre.

Los escenarios proyectados al 2033 presentan una incertidumbre inherente a los modelos de cambio de cobertura y uso de suelo. Esto se debe a los datos de entrada, parámetros usados, procesos del modelo, interacción con representaciones matemáticas, supuestos metodológicos considerados y la compleja relación de los procesos socioambientales que influyen en la dinámica del cambio (Gaur & Singh, 2023).

La incertidumbre relacionada con la calidad de los datos de entrada se debe a la resolución espacial que puede limitar la identificación de categorías pequeñas; así como la nubosidad y disponibilidad de imágenes que pueden generar cierto error en la identificación de la cobertura y uso de suelo (Jaramillo *et al.*, 2025; Bairwa *et al.,* 2025). Además, "los errores de la clasificación inicial se difunden y potencian en las proyecciones" (Rojas, p.24, 2025).

La incertidumbre relacionada con el modelo Land Change Modeler (LCM) se debe a los supuestos metodológicos que causan incertidumbre estructural. Por ejemplo, la aceptación de la estacionariedad de los patrones de cambio, es decir que estos se van a mantener en los próximos años, por lo que se limita la representación de transiciones rápidas causadas por políticas públicas, fenómenos extremos u otros (Rojas, 2025; Gaur & Singh, 2023). Además, el uso de Redes Neuronales Artificiales (ARN) opera como un modelo de tipo "caja negra", "lo que complica la comprensión causal de las relaciones" (Rojas, p. 24, 2025).

Otra fuente de incertidumbre se asocia a la exclusión de variables sociales, económicas, políticas y culturales, ya que su representación espacial puede resultar compleja y la disponibilidad de información a una escala y temporalidad adecuada es limitada (Bairwa *et al.,* 2025; Jaramillo *et al*., 2025). Sin embargo, es importante precisar que, diferentes estudios han priorizado el análisis de variables físicas y algunas sociales, lo cual no invalida sus proyecciones, sino que limita la interpretación de sus resultados.

Las incertidumbres mencionadas, no invalidan los escenarios proyectados; sin embargo, estos no deben considerarse proyecciones deterministas de la realidad, sino posibles escenarios de los patrones espaciales y tendencias potenciales. Los resultados son

relevantes para la planificación territorial por lo que se debe considerar sus limitaciones y complementar con investigaciones futuras en campo y con enfoques socioeconómicos (Gaur & Singh, 2023).

En resumen, este estudio reconoce las limitaciones e incertidumbre del modelo de proyección; no obstante, los resultados permiten la comprensión más detallada de la dinámica del cambio de la cobertura y uso de suelo en el distrito de El Tambo. Se precisa, la necesidad de realizar investigaciones que consideren un análisis más profundo de los impulsores de cambio en el distrito donde se incluya a los actores sociales. Por ejemplo, investigaciones como las de Jaramillo *et al*., (2025) consideran como limitaciones los factores sociales, económicos, políticos e incluso las políticas públicas debido a la falta de información sobre su representación espacial. En esa misma línea, Bairwa *et al*., (2025) coincide en la necesidad de un análisis más detallado de las políticas e investigaciones de campo en este tipo de investigación.

5.4 Discusión de resultados

En relación con el primer objetivo de investigación, se identificaron 9 categorías de cobertura y uso de suelo en base a la integración de información primaria producto del trabajo de campo e información secundaria. La leyenda Corine Land Cover adaptada para Perú permitió el orden jerárquico y estandarizado, así como ajustar las categorías de nivel III para realizar una investigación coherente a la realidad del distrito, tal como lo hicieron Acco (2021); Aguilar y Orosco (2023); y Cabrera (2024) quienes incorporaron en el nivel III a los cuerpos de agua (lagunas, lagos y/o ríos) dentro de la categoría de áreas húmedas continentales (nivel II).

La clasificación mediante el logaritmo de Clasificación de Máxima Verosimilitud (Maximum Likelihood Classification - MLC) brindó resultados aceptables con valores de precisión global mayores a 86 %, índices de Kappa superiores a 0.8 e índices QADI menor o igual a 0.13. Estos sustentan la validez estadística y se asemejan a investigaciones en diferentes partes del país donde usaron el logaritmo MLC. Por ejemplo, Idrogo (2022) obtuvo valores de Kappa mayores a 0.92 en el distrito de Sócota (Cajamarca); mientras que Cabrera (2022) y Pérez (2021) en áreas costeras obtuvieron valores de 0.72 y 0.88 respectivamente; en la zona selva Aguilar & Orosco (2023) obtuvieron valores mayores a 0.76. Finalmente, Medina (2021) obtuvo un valor de 0.96 en un área altoandina.

En relación al segundo objetivo de investigación, en el distrito predomina el herbazal abierto (HERA) con una superficie máxima de 8 437.50 ha (50.73 %). La segunda categoría predominante hasta el año 2013 fueron las áreas agrícolas heterogéneas (CULT) con una superficie de 2 203.92 ha (13.25 %). Sin embargo, en el 2023 las áreas urbanizadas (AUR) ocuparon el segundo lugar; y los afloramientos rocosos y tierras desnudas (AR-TD) el tercer lugar; desplazando al cuarto lugar a las áreas agrícolas heterogéneas. En todos los años las categorías con menor superficie fueron los bosques (BOS), turberas y bofedales (BOF); glaciares (GLA) y cuerpos de agua (AGU) representando en conjunto menos del 3.84 % de la superficie distrital. A nivel de la provincia de Huancayo, según Tinoco (2024) el herbazal representa casi el 65 % del

territorio; y los bosques (naturales y plantados); afloramientos rocosos y tierras desnudas son más extensos que las áreas agrícolas y el tejido urbano que apenas ocupan el 8 %.

En general las áreas urbanizadas y el bosque presentaron una tendencia creciente continua; mientras se redujeron las áreas agrícolas heterogéneas. Esto es similar a lo registrado a nivel del Valle del Mantaro en la investigación de Arana (2018). No obstante, a nivel de la provincia de Huancayo, según Tinoco (2024) en el periodo 2000-2021 se incrementaron las áreas agrícolas (permanentes o heterogéneas) en áreas de bosques primarios que fueron deforestados. Respecto al herbazal denso y herbazal abierto a nivel provincial consideran la reducción del herbazal y arbustal, lo cual podría asemejarse si se agrupan las 2 categorías en el distrito de El Tambo. Respecto al incremento de los afloramientos rocosos y tierras desnudas, es similar a nivel provincial. En relación con los glaciares, en el distrito se perdió cerca del 33 % y a nivel provincial, según Tinoco (2024) se perdió el 31 %; mientras que, solo a nivel del área de Conservación Regional (ACR) Huaytapallana en el periodo 1993-2023 se perdió casi 42 % de la superficie (Barzola & Fretel, 2024); de igual forma la tendencia decreciente de las turberas y bofedales no solo es a nivel del distrito. Por otro lado, respecto a los cuerpos de agua, a nivel de la provincia se observa el ligero crecimiento de esta categoría. Estas diferencias a nivel de la provincia o Valle del Mantaro estarían relacionadas principalmente con las categorías que están dentro de estas áreas y cómo la población local hace uso de estos.

El análisis de intensidad de cambios permitió entender la dinámica del cambio con un enfoque a nivel de intervalo, categorías y transición. En ese sentido, se identificó que el periodo 2013-2023 tuvo una tasa de cambio 0.83 que supera lo calculado para los otros intervalos. La intensidad de cambio a nivel de categoría identificó 5 categorías activas, donde las áreas urbanizadas fueron la única categoría que tuvo un crecimiento permanente, a diferencia de las áreas agrícolas heterogéneas, bosque, glaciares y cuerpos de agua. En el periodo 1990-2023, el 13.76 % (2 289.42 ha) del distrito tuvo algún tipo de cambio y a nivel espacial, estas se distribuyeron principalmente en la parte baja y media del distrito en altitudes menores a 4100 m s. n. m.

En los 3 intervalos de tiempo (1990-2003, 2003-2013 y 2013-2023) el crecimiento de las áreas urbanizadas (AUR) se dio principalmente sobre áreas agrícolas heterogéneas

(CULT), lo que evidencia una presión antrópica sostenida. Este patrón difiere a nivel de la provincia de Huancayo, donde las áreas urbanizadas reemplazaron principalmente las categorías de arbustal y herbazal; y en menor medida a las áreas agrícolas y plantaciones forestales (Tinoco, 2024). No obstante, a nivel del Valle del Mantaro diferentes estudios señalan que la expansión urbana ha influido significativamente en la reducción de áreas agrícolas, impulsada por diferentes factores sociales, económicos e incluso políticos (Sánchez, 2024; Granados, 2023; Arana, 2018). De manera similar, en el distrito de Huancayo, Arauco (2020) menciona que el crecimiento abrupto de la ciudad ha generado pérdida de áreas agrícolas y cuerpos de agua. Estas diferencias y similitudes resaltan la importancia del análisis en diferentes escalas espaciales, considerando las particularidades territoriales y el contexto local de las áreas de estudio. Espacialmente, no solo las áreas agrícolas colindantes al casco urbano se transformaron, sino que en los centros poblados de Hualahoyo, Cochas Chico, Cullpa Alta y Cullpa Baja también se dio una expansión urbana evidente.

Otro patrón de transición relevante es el incremento del bosque (BOS) principalmente sobre herbazal abierto (HERA) y áreas agrícolas heterogéneas (CULT). A nivel de la provincia de Huancayo Tinoco (2024) diferencia entre bosque denso alto y bosque plantado, señalando que el primero se origina sobre áreas agrícolas lo que podría sugerir un proceso de recuperación natural; mientras que el segundo tipo de bosque es resultado de programas de reforestación en áreas de arbustales o herbazales.

En el distrito de El Tambo el incremento de bosque según lo observado en campo se debería principalmente a plantaciones forestales de pino y eucalipto principalmente en áreas de herbazal abierto y áreas agrícolas heterogéneas. El incremento de bosques en áreas agrícolas heterogéneas sugiere la ausencia de un enfoque ambiental integral en la reforestación e intereses económicos de la población local. Al respecto Haller (2017) identificó en el Valle del Mantaro que la búsqueda de otras fuentes de ingreso más rentables que la agricultura impulsa la plantación de eucalipto con fines comerciales. Asimismo, también podría estar relacionado con el interés de promover el desarrollo de atractivos turísticos ya que estas plantaciones se han realizado en el “Bosque Dorado”, “Bosque 7 Leyendas” y “Bosque de los Pinos” que son visitados principalmente por la

población local. Sin embargo, resalta la distribución restringida y reducida de los árboles nativos como el Queñual y Aliso a pesar de que brindan servicios ecosistémicos relacionados con el mejoramiento del suelo, regulación hídrica almacenando agua y son hábitat de animales silvestres (Romero, 2021; Pacosonco, 2024).

Respecto al herbazal denso (HERD), se encuentra en la parte alta del distrito y lejos de la influencia directa de la urbanización. Su transformación a herbazal abierto y viceversa, según lo observado en campo podría estar influenciada por la presencia de las estancias y la ganadería. A nivel provincial, Tinoco (2024) reportó que la transformación del herbazal se relaciona con el pastoreo y la quema.

En cuanto a la categoría de afloramientos rocosos y tierras desnudas (AR-TD), se relaciona principalmente con la pérdida de glaciares debido a la variabilidad climática. Estudios realizados en el Área de Conservación Regional Huaytapallana señalan la relación entre la cobertura glaciar y la temperatura. Por ejemplo, Barzola (2024) identificó una correlación negativa significativa con la temperatura media, mientras que De la Cruz (2023) encontró una relación significativa con la temperatura máxima. Además, ambos investigadores coincidieron en la leve influencia de la precipitación en la variabilidad del glaciar.

Las turberas y bofedales (BOF) se transformaron principalmente en herbazal denso. A nivel provincial Tinoco (2024) relaciona la transformación de esta categoría con el sobrepastoreo. Mientras que, en el Área de Conservación Regional Huaytapallana, Toribio (2023) encontró una relación inversa moderada entre los bofedales y el retroceso glaciar. Además, el incremento de la temperatura eleva las tasas de evapotranspiración y modifica los patrones de precipitación haciendo que sean intensas pero esporádicas afectando a los bofedales (Ji *et al.,*2025). En ese sentido, la dinámica del cambio de esta categoría también se debería a procesos más complejos relacionados con el sistema hidrológico y el cambio climático que no se restringe solo al distrito de El Tambo.

En relación con los cuerpos de agua (lagos, lagunas y ríos), se transformaron principalmente en afloramientos rocosos y tierras desnudas. A nivel de la provincia de Huancayo, Tinoco (2024) para el periodo 2000-2021 reportó la reducción de los ríos

debido a la variación del caudal; no obstante, para lagos y lagunas identificó el incremento causado por la desglaciación. Por su parte, Arana (2018) en el periodo 1965-2015 identificó la reducción de los cuerpos de agua tanto en la provincia de Huancayo y en el Valle del Mantaro. Estos resultados sugieren que la dinámica de esta categoría estaría relacionada principalmente con procesos climáticos y geomorfológicos.

Respecto al tercer objetivo de investigación, la proyección de la cobertura y uso de suelo al 2033 en el escenario tendencial evidencia la continuidad de las dinámicas espaciales observadas en los periodos anteriores. Se proyecta un incremento de casi el 73.96 % de las áreas urbanizadas y la reducción del 45.29 % de áreas agrícolas heterogéneas. En términos numéricos, el crecimiento urbano es coherente con lo reportado por Arana (2018) que proyectó al 2035 el incremento del 77 % de estas áreas en la provincia de Huancayo. En contraste, Arauco (2020) en base al análisis del periodo 1995-2015 para el distrito de Huancayo, colindante al distrito de El Tambo, proyectó la reducción del 16 % de zonas agrícolas y el incremento del 19 % de las áreas urbanas para el año 2035. Estas diferencias se deberían principalmente a la escala espacial de análisis, características de las áreas de estudio, periodos de evaluación y metodologías empleadas. No obstante, el resultado de esta investigación, así como la bibliografía consultada coinciden en vincular directamente el crecimiento de las áreas urbanizadas sobre las áreas agrícolas. En relación con las otras categorías no se encontraron investigaciones donde se presenten resultados proyectados; sin embargo, para el distrito se proyecta la continuidad de las tendencias ya identificadas previamente.

El escenario tendencial y los escenarios restrictivos presentan ciertas similitudes a nivel espacial y cuantitativo. En las áreas restrictivas donde se mantienen comportamientos similares con o sin restricción, se explica en primer lugar, por su lejanía del casco urbano limitando su transformación directa. También estaría relacionado con las transiciones elegidas, por ejemplo, no se consideró la transformación de bosque hacia otras categorías por lo que dentro de las áreas los bosques no se transforman a otras categorías. Por último, podría estar relacionada con la metodología empleada donde se eligieron solo las 6 transiciones con mayor superficie de cambio y no todas las transiciones identificadas. El proceso metodológico se realizó considerando los parámetros

recomendados y la validación correspondiente; sin embargo, las proyecciones tienen una incertidumbre inherente por lo que no son escenarios deterministas, sino posibilidades por lo que su interpretación debe abordarse considerando ello (Gaur & Singh, 2023).

Es importante precisar que, no se identificaron investigaciones que proyecten escenarios futuros para las diferentes categorías de cobertura y uso de suelo en el distrito de El Tambo, ya sea a nivel de la provincia de Huancayo o del departamento de Junín por lo que se realizó la validación retrospectiva que es utilizada ampliamente en diferentes investigaciones como las realizadas por Jaramillo et al. (2025), Bairwa et al. (2025), Sopla (2023), Choudhary et al. (2025), Kumar et al. (2025), Eshita et al. (2024) y Rojas (2025) quienes obtuvieron índices de Kappa de 0.95, 0.79, 0.82, 0.85, 0.84, 0.83 y 0.84 respectivamente que sustentan la validez del modelo de proyección que usaron.

Los resultados de esta investigación presentan diferentes patrones de transición de las 9 categorías identificadas; no obstante, la bibliografía existente se enfoca principalmente en la relación de las áreas agrícolas y áreas urbanas. En ese sentido, las investigaciones señalan como impulsores socioeconómicos el crecimiento demográfico, migración de la zona rural a urbana, proyectos inmobiliarios y la débil planificación territorial (Arana, 2018; Arauco, 2020 y Reyna 2022). También, se menciona el crecimiento urbano horizontal y baja densidad poblacional (Haller, 2017; Arauco, 2020; Granados, 2023; Reyna, 2022). Adicionalmente, la implementación de infraestructura vial y proyectos de inversión pública actúan como impulsores indirectos al incrementar el valor del suelo agrícola y favorecer su venta frente a su uso productivo; proceso reforzado por políticas públicas que no incorporan adecuadamente las externalidades ambientales y sociales asociadas a la construcción en áreas agrícolas (Sánchez, 2024). En base a lo descrito, se reconoce que el cambio de cobertura y uso de suelo es resultado de la interacción de diferentes impulsores; sin embargo, su integración resulta compleja en la elaboración de proyecciones debido a la falta de información y la dificultad de su representación espacial, siendo este último un requisito indispensable para su incorporación en el programa Terrset y en otros programas. Por ello, en esta investigación se evaluaron y eligieron impulsores con representación cartográfica usados frecuentemente en este tipo de investigaciones; por ejemplo, investigadores como Aguilar

& Orosco (2023); y Cachay (2023) proyectaron escenarios al 2030 y 2052 respectivamente, usando programas como Terrset y QGIS. Además, se precisa que su influencia estadística se sustentó en el análisis estadístico V Cramer y en los diferentes procesos de proyección se consideraron parámetros recomendados que respaldan la validez y consistencia de los escenarios futuros proyectados.

En el contexto actual es importante mencionar la relación del cambio de cobertura de uso de suelo y el cambio climático. Según el IPCC (2016) y la FAO (2020) el cambio de cobertura y uso de suelo genera la emisión de CO_2. No obstante, también es importante precisar que existe una relación compleja y bidireccional entre el cambio de cobertura de uso de suelo y el cambio climático (Bununo *et al.,* 2023). A nivel local, las investigaciones realizadas por Barzola (2024) y De la Cruz (2023) evidenciaron la influencia de la temperatura con la variabilidad del ACR del Nevado Huaytapallana. Además, el análisis de la dinámica del cambio evidenció que las áreas urbanizadas, áreas agrícolas heterogéneas y bosque presentan transiciones generadas por influencia antrópica directa; mientras que el herbazal denso, turberas y bofedales; y cuerpos de agua (lagunas altoandinas) por su ubicación podrían responder a factores climáticos e hidrológicos por lo que es necesario realizar investigaciones específicas para analizar el nivel de relación.

En relación a la afectación de los servicios ecosistémicos, Cano & Haller (2018) mencionan que la contaminación y el cambio climático son percibidos como los principales factores de cambio de los servicios ecosistémicos hidrológicos (SEH) en la subcuenca Shullcas, mientras que el cambio de cobertura de suelo fue considerado como sexto factor. A continuación, se detallan los posibles efectos del cambio de cobertura y uso de suelo en los servicios ambientales en el distrito de El Tambo.

Servicios de provisión: El agua potable proviene de 15 fuentes subterráneas, 4 lagunas glaciares y 6 lagunas pluviales distribuidas en la subcuenca Shullcas (Yaringaño, 2019). De estas 12 fuentes subterráneas (pozos), 3 lagunas glaciares y 4 lagunas pluviales se ubican en el distrito de El Tambo, por lo que la pérdida de cobertura glaciar, y cuerpos de agua podría alterar la provisión de este recurso.

En la subcuenca Shullcas se identificó para el año 2012, la producción principalmente de Rye Grass, Trébol, Maiz Choclo y papa blanca (Yaringaño, 2019). A nivel del Valle del Mantaro en el año 2022, en el sector ubicado en la provincia de Huancayo la producción agrícola fue cerca de 84 toneladas de papa blanca, maíz choclo, papa de color, papa nativa, maíz amiláceo, frijol y zanahoria (Sánchez, 2024). Considerando ello, en el distrito de El Tambo, la pérdida de las áreas agrícolas que son áreas limitadas afecta directamente la producción de alimentos, y según Granados (2023) constituye un impacto negativo que es invalorable ya que afecta también a las generaciones presentes y futuras.

Servicios de regulación: Alanya (2025), concluyó que los cambios de uso de suelo en la subcuenca Shullcas en el periodo 2017-2020 han alterado la dinámica hidrológica ya que el incremento de bosque y vegas de ríos favorecieron la infiltración y redujeron la escorrentía; mientras que la pérdida de áreas agrícolas e incremento de áreas urbanizadas se relacionaron con el riesgo de inundación.

En esa misma línea, Granados (2023) a nivel del Valle del Mantaro, sostiene que la transformación de áreas agrícolas en áreas impermeables (áreas urbanas principalmente) genera impactos negativos como la reducción de la infiltración de agua, alteración del ciclo hidrológico, erosión del suelo, disminución de agua para consumo, etc. En ese sentido, el incremento de bosque en la zona este del distrito de El Tambo donde hay fuertes pendientes, estaría contribuyendo a favor del proceso de infiltración y disminución de la erosión, no obstante, el incremento de las áreas urbanizadas tendría un efecto negativo.

Servicios culturales: El incremento de bosque se ha dado principalmente en las zonas turísticas “Bosque Dorado”, “Bosque 7 Leyendas” y “Bosque de los Pinos”. Yauri (2019) realizó la valoración de los servicios ecosistémicos culturales (SEC) del Bosque Dorado (religioso, estético, recreativo y turístico) concluyendo que el SEC cultural estético presentó mayor valor (CV = 67 351.40 soles/año) a diferencia del SEC religioso (CV = 34 640.64 soles/año). En ese contexto, las otras zonas de bosque también serían proveedores de servicios ecosistémicos culturales ya que son lugares de recreación principalmente de la población local.

Por otro lado, el Área de Conservación Regional Huaytapallana, es considerada como un lugar turístico que ofrece el servicio ecosistémico cultural de belleza escénica (Yaringaño, 2019).

Servicios de soporte, hábitat o de base:

Si bien en 30 años, el bosque ha duplicado su superficie, esto se debe principalmente a las plantaciones forestales de pino y eucalipto. Según la bibliografía, estas especies influyen negativamente en la composición del suelo, generan la acidificación, reducción de materia orgánica y contenido de humedad del suelo (Barahona, 2012).

Específicamente, en el caso de las turberas y bofedales y los glaciares, a pesar de que esas categorías no ocupan grandes extensiones en el distrito, cumplen servicios ecosistémicos asociados al almacenamiento de agua (INAIGEM, 2023) y en el caso de los glaciares también distribuyen el agua de forma paulatina hacia otras fuentes (Barzola y Fretel, 2024). Además, en el contexto de cambio climático, las turberas y bofedales cumplen un rol fundamental en el almacenamiento de carbono, así como la provisión de forraje para el ganado (INAIGEM, 2023). En ese sentido, la reducción de estas categorías afectaría los servicios ecosistémicos mencionados.

En relación con los impactos sociales, Haller (2017) concluye que la transformación de las áreas agrícolas de la parte baja de la ciudad de Huancayo genera que los campesinos busquen zonas más altas para los cultivos donde la falta de infraestructura, la temperatura y altitud son factores limitantes para el desarrollo adecuado de esta actividad. En consecuencia, los campesinos migran hacia otras actividades como la crianza de animales menores y plantaciones forestales de eucalipto. Por otro lado, en relación con las otras categorías, es necesario realizar investigaciones donde se aborde con más detalle la dinámica social que permita integrar los resultados obtenidos en esta investigación.

En base a lo descrito anteriormente, los resultados obtenidos cumplen con las hipótesis planteadas.

5.5 Aporte de la investigación:

Resultados del análisis multitemporal del cambio de cobertura y uso de suelo en el periodo 1990-2023 y proyección de su distribución al año 2033. Además, las categorías de acuerdo con Corine Land Cover permite y permintirá contrastar los resultados con otras investigaciones que se realicen en el ámbito de estudio o en otros lugares.

Se analizó la dinámica del cambio y se identificó los patrones de cambio, dando a conocer que las tendencias de cambio de las categorías de cobertura y uso de suelo a nivel distrital no necesariamente son iguales a los identificados a nivel provincial o del Valle del Mantaro, por lo que es importante contar con información actualizada a nivel distrital para la toma de decisiones que se ajusten a la realidad actual y distrital.

Como aporte metodológico, en esta investigación se incorporó el análisis de intensidad de cambio (nivel de intervalo, categoría y transición) propuesto por Aldwaik y Pontius (2012), lo cual ofreció un análisis más profundo de las dinámicas del cambio en el distrito en el periodo de 33 años. Durante la revisión de investigaciones realizadas a nivel nacional no se identificaron antecedentes de su aplicación en el análisis de cambio de cobertura y uso de suelo, por lo que su aplicación en esta investigación proporciona una interpretación más robusta de los patrones de cambio que se han dado en el distrito.

A partir de lo observado en el trabajo de campo, se identificó la preferencia de las plantaciones de pinos y eucaliptos por encima de los árboles nativos que han quedado restringidas principalmente en el lugar conocido como “Bosque Dorado” dando a conocer que, si bien los bosques duplicaron su superficie en 33 años esto no se debería a un proceso de recuperación natural, sino a las plantaciones forestales promovidas por las comunidades campesinas de Paccha, Cochas Grande y/o Cochas Chico. Además, se identificaron estancias y corrales en la zona alta del distrito lo cual estaría asociado principalmente a la ganadería.

CONCLUSIONES

El análisis multitemporal del cambio de cobertura y uso de suelo para el periodo 1990-2023 brindó resultados espaciales y cuantitativos de la distribución y los cambios de las 9 categorías identificadas. En el periodo de 33 años, el 13.76 % (2 289.42 ha) del distrito tuvo algún tipo de cambio; evidenciando la reducción del 40.31 % (1 142.55 ha) de áreas agrícolas heterogéneas causado principalmente por la conversión en áreas urbanizadas que se incrementaron en el 96.76 % (885.51 ha). También se observó el incremento del 113.97 % (523.98 ha) del bosque impulsado por plantaciones forestales de pino y eucalipto en zonas de herbazal abierto y áreas agrícolas heterogéneas. En el caso de los glaciares; turberas y bofedales; y cuerpos de agua representan menos del 3.84 % del distrito; sin embargo, se evidenciaron tendencias decrecientes lo que podría influir en los servicios ecosistémicos que ofrecen. Estos resultados en conjunto permitieron entender los procesos de cambio históricos, identificar las categorías dinámicas, así como patrones de transición dominantes que sirvieron de base para proyectar 1 escenario tendencial y 2 restrictivos que siguieron los patrones espaciales y tendenciales identificados para el periodo 1990-2023.

Se identificaron 9 categorías de cobertura y uso de suelo aplicando la leyenda Corine Land Cover (CLC): áreas urbanizadas (AUR), áreas agrícolas heterogéneas (CULT); bosque (BOS); herbazal abierto (HERA); herbazal denso (HERD); afloramientos rocosos y tierras desnudas (AR- TD); glaciares (GLA); turberas y bofedales (BOF) y cuerpos de agua (AGU). El herbazal abierto fue la categoría dominante ocupando cerca del 50% del distrito en cada año evaluado. Además, se observó la restricción por altitud, donde las áreas urbanizadas, áreas agrícolas heterogéneas y bosque se distribuyeron en altitudes menores a 4 100 m s. n. m. La identificación de la cobertura y uso de suelo, así como su distribución espacial sirvieron para la proyección al 2033.

Para el periodo 1990-2023, a nivel de los 3 subintervalos de tiempo (1990-2003, 2003-2013 y 2013-2023), el último periodo presentó una intensidad de cambio rápido donde el área de transformación fue de 1 375.83 ha (8.27 %) y la tasa de cambio fue de 0.83. Los patrones de transición evidenciaron dinámicas dominantes entre las áreas agrícolas heterogéneas (CULT), bosque (BOS) y herbazal abierto (HERA) que ganaron

y/o perdieron superficie entre sí; y también el crecimiento sostenido de las áreas urbanizadas (AUR) sobre las áreas agrícolas heterogéneas ubicadas principalmente en la periferia del casco urbano y en los centros poblados de Hualahoyo, Cochas Chico, Cullpa Alta y Cullpa Baja que han evidenciado un desarrollo urbano importante. En general, estos cambios se concentraron en altitudes menores a 4 100 m s. n. m. lo que sugiere la influencia directa de diversos impulsores antrópicos sobre categorías con áreas limitadas. En contraste, las transiciones del herbazal denso, cuerpos de agua (principalmente lagunas altoandinas), turberas y bofedales; y glaciares al estar lejos del casco urbano de la ciudad, podrían estar más vinculados a factores climáticos e hidrológicos.

Se elaboró la proyección de la cobertura y uso de suelo al año 2033 tomando como base los años 1990 y 2023, el escenario tendencial y los 2 escenarios restrictivos proyectaron la continuidad de las tendencias históricas identificadas. Destaca el incremento del 74 % de áreas urbanizadas y del 130 % de bosque; y la pérdida de casi el 50 % de áreas agrícolas heterogéneas y cerca del 30 % de los glaciares. Los escenarios proyectados no presentaron grandes diferencias entre sí a nivel espacial ni cuantitativo lo que se explica por la distribución de las categorías y supuestos considerados. Además, es importante precisar que las proyecciones están sujetas a incertidumbres inherentes relacionadas con las variables explicativas elegidas, calidad y resolución de los datos espaciales e incluso las características del programa usado. Asimismo, resulta compleja la integración de los diferentes factores sociales, económicos y/o políticos en la proyección de escenarios por lo que no son escenarios determinantes de la realidad y deben interpretarse en conjunto con los datos históricos.

RECOMENDACIONES

Se recomienda a la Municipalidad Distrital de El Tambo incorporar los resultados en la actualización de los instrumentos de planificación territorial, donde se promueva el crecimiento urbano vertical y la gestión sostenible de las áreas agrícolas heterogéneas colindantes al casco urbano. Asimismo, se sugiere coordinar con las comunidades y otros actores locales para fomentar la reforestación con especies nativas, en áreas clave como el Bosque Dorado, Bosque de los Pinos, Bosque de las 7 Leyendas; así como en áreas de herbazal abierto que es una categoría que ocupa más del 50 % del distrito.

Además, se recomienda a la Municipalidad Distrital de El Tambo y Gobierno Regional de Junín, trabajar con instituciones como el INAIGEM (Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña) para establecer medidas de recuperación y protección de las turberas y bofedales; y cuerpos de agua (principalmente lagunas altoandinas) que son fundamentales en la regulación hídrica y provisión de agua para la población local.

- Se recomienda a la Municipalidad Distrital de El Tambo que los diferentes instrumentos de ordenamiento territorial consideren las restricciones altitudinales del distrito que implican la disponibilidad de una superficie limitada para el adecuado desarrollo de ciertas categorías de cobertura y uso de suelo como las áreas agrícolas heterogéneas. Por lo que es necesaria una planificación más eficiente, orientada al uso racional y sostenible.

  Adicionalmente, los escenarios restrictivos al 2033 no proyectan el incremento de las áreas urbanizadas dentro de todas las áreas restrictivas (áreas con importancia ambiental, social y/o cultural). No obstante, se recomienda establecer medidas que aseguren la permanencia de estas en el mediano y largo plazo.
- Al Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego (MIDAGRI), se le recomienda realizar programas de fortalecimiento de la agricultura local y/o familiar en áreas agrícolas colindantes al casco urbano del distrito; así como en zonas colindantes a los centros poblados que tuvieron mayor crecimiento urbano para el periodo 1990-2023 con la

finalidad de promover la permanencia de los terrenos agrícolas heterogéneas que son relevantes para la seguridad alimentaria en el distrito de El Tambo.

- A los futuros investigadores, se les recomienda ahondar en los factores de cambio a nivel distrital de las categorías del herbazal denso, cuerpos de agua (principalmente lagunas altoandinas) y las turberas y bofedales.

  Asimismo, se recomienda realizar investigación en campo, donde se involucre a la población local (comunidades campesinas, asociación de ganaderos, entre otros) mediante encuestas y/o entrevistas para entender la dinámica social y así poder incluir más variables o impulsores de cambio que usualmente no son considerados en el modelamiento de escenarios prospectivos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Acco, I. (2021). *Transformaciones socio-espaciales producto de los cambios de cobertura y uso del suelo del distrito y provincia de Hualgayoc - departamento Cajamarca. Años 2002-2017* [Tesis para optar el título de Geógrafa]. Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Obtenido de: https://cybertesis.unmsm.edu.pe/item/62bb03f1-bb7f-4929-8838-2f2796753a56

Aguilar, L., & Orosco, M. (2023). *Análisis multitemporal del cambio de uso de Suelo, utilizando el método de Markov, en la Provincia de Coronel Portillo, Departamento de Ucayali período 2000 – 2030* [Tesis para optar el título de ingeniero ambiental]. Universidad Nacional de Ucayali. Obtenido de: http://repositorio.unu.edu.pe/handle/UNU/6491

Aldwaik, S. & Pontius Jr, R. (2012). Intensity analysis to unify measurements of size and stationarity of land changes by interval, category, and transition. *Landscape and Urban Planning,* 106(1), 103-114. Obtenido de: https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2012.02.010

Alanya, P. (2025). *Análisis diacrónico del uso del suelo y su influencia en la escorrentía de la subcuenca del río Shullcas, Huancayo-Perú* [Tesis para optar el título de ingeniero civil]. Universidad Peruana los Andes. Obtenido de: https://repositorio.upla.edu.pe/handle/20.500.12848/9416

Arana, F. (2018). *El crecimiento urbano y su influencia por el cambio de uso de tierras en el Valle del Mantaro* [Tesis para obtener el grado de doctor en medio ambiente y desarrollo sostenible]. Universidad Nacional Federico Villareal Repositorio institucional UNFV. Obtenido de: https://repositorio.unfv.edu.pe/handle/20.500.13084/2167

Arauco, S., Huamán, H. & Soriano, G. (2020). Dinámica de cambios de usos de suelo mediante agentes inteligentes y cadenas de Markov en el distrito de Huancayo. *Prospectiva Universitaria,* 17(1), 149 -158. Obtenido de: https://doi.org/https://doi.org/10.26490/uncp.prospectivauniversitaria.2020.17.1387

Arbelo, M., Labrador, M. & Évora, J. (2012). *Satélites de teledetección para la gestión del territorio.* Satelmac. Obtenido de: https://geoinnova.org/libro/satelites-teledeteccion-la-gestion-del-territorio/

Arias, J. & Covinos, M. (2021). *Diseño y metodología de la investigación* (1ra ed.). Enfoques Consulting EIRL.

Arnillas, C.A; Barrena, V; Llactayo, W; Ortíz, H; Regal, F; Rubín de Celis, E; Vásquez, P; Drenkhan, F; Llerena, C.E; Espino, P; García, V; Gonzáles-Zúñiga, S; Gushiken, E; López, D. y Vásquez, R. (2012). Informe Final del Proyecto: Análisis de las Dinámicas de Cambio de Cobertura de la Tierra en la Comunidad

Andina. Componente Nacional Perú – Primera Etapa. Centro de Datos para la Conservación (CDC-UNALM). Laboratorio de Teledetección (LTAUNALM). Dirección General de Ordenamiento Territorial - Ministerio del Ambiente (DGOT - MINAM). Fundación para el Desarrollo Agrario (FDA).

Autoridad Nacional del Agua -ANA. (2015). *Evaluación de recursos hídricos en la cuenca de Mantaro*. Obtenido de: https://hdl.handle.net/20.500.12543/36

Balieiro, B. & Veloso, G. (2022). Análise multitemporal da cobertura do solo da terra indígena Ituna-Itatá através da classificação supervisionada de imagens de satélites. *Revista Cerrados*, 20(2), 261-282. Obtenido de: https://doi.org/10.46551/rc24482692202227

Barahona, J. (2012). Influencia de las plantaciones de Eucalyptus globulus Labill y Pinus radiata D. don en las propiedades del suelo, Chamiseria – Junín. Universidad Nacional del Centro del Perú. Obtenido de: https://repositorio.uncp.edu.pe/items/5d07d803-a7f0-4a4a-b0c8-f68b24233dde

Barba, D. (2019). *Análisis prospectivo del proceso de deforestación en el sector la Pampa-Guacamayo, Tambopata - Madre de Dios, Periodo 1999 al 2030.* [Tesis para optar el título de ingeniero forestal y de medio ambiente]. Universidad Nacional de Madre de Dios. Obtenido de: https://repositorio.unamad.edu.pe/handle/20.500.14070/415

Bairwa, B., Sharma, R., Kundu, A., Sammen, S., Alshehri, F., Pande C., Orban, Z. & Salem, A. (2025). Correction: Predicting changes in land use and land cover using remote sensing and land change modeler. *Frontiers in Environmental Science,* 13. Obtenido de: https://doi.org/10.3389/fenvs.2025.1646977

Barrios, J. & Ochoa, L. (2021). *Análisis multitemporal de cambios del uso de suelo y cobertura en la cuenca media del río Bogotá desde 2013 a 2020.* [Tesis para optar el título de ingeniero ambiental]. Universidad de Cundinamarca. Obtenido de: https://repositorio.ucundinamarca.edu.co/items/f4f84055-1c61-4cd1-b293-b94a1a614f7c

Barzola, D. & Fretel, N. (2024). *Dinámica glaciar del nevado Huaytapallana y su relación con la variabilidad climática desde 1993-2023.* [Tesis para optar el título de ingeniero ambiental]. Universidad Continental. Obtenido de: https://repositorio.continental.edu.pe/handle/20.500.12394/15734

Bununu, Y., Bello, A. & Ahmed, A. (2023). Land cover, land use, climate change and food security. *Sustainable Earth Reviews,* 6(16). Obtenido de: https://doi.org/10.1186/s42055-023-00065-4

Cabrera, V. (2022). *Análisis multitemporal del comportamiento forestal en el ecosistema manglar mediante percepción remota, período 1986 a 2021, Tumbes* [Tesis para optar el título de ingeniero forestal y medio ambiente]. Universidad Nacional de

Tumbes. Obtenido de: https://repositorio.untumbes.edu.pe/items/cb564f6a-1043-4d57-9c63-2fc95faf1e80

Cabrera, Y. (2024). *Relación de la expansión urbana con el crecimiento poblacional mediante análisis multitemporal de la ciudad de Ilave, entre los años 1993 – 2022.* [Tesis para optar el título de ingeniero topógrafo y agrimenor]. Universidad Nacional del Altiplano. Obtenido de: https://repositorio.unap.edu.pe/handle/20.500.14082/21987

Cachay, R. (2023). *Cambios de las coberturas y usos del suelo en la microcuenca del Río Jucusbamba, Amazonas (Perú), 1992-2052.* [Tesis para optar el título de ingeniero ambiental]. Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas. Obtenido de: https://repositorio.untrm.edu.pe/handle/20.500.14077/3100

Cano, D. & Haller, A. (2018). Los servicios ecosistémicos hidrológicos: entre la urbanización y el cambio climático. Percepción campesina y experta en la subcuenca del río Shullcas, Perú. *Espacio y Desarrollo*, (31), 7-32. Obtenido de: https://revistas.pucp.edu.pe/index.php/espacioydesarrollo/article/view/20174

Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres - Cenepred (s.f.). *Sistema de Información para la Gestión de Riesgo de Desastres*. Obtenido el 06 de junio del 2025 de: https://sigrid.cenepred.gob.pe/sigridv3/mapa

Centro Nacional de Planeamiento Estratégico (2025). Mayores cambios en el uso del suelo. https://observatorio.ceplan.gob.pe/ficha/t61

Chuvieco, E., Hantson, S., Pons, X., Domingo, C., Cea, C., Moré, G., Cristóbal, Peces, J. & Tejeiro, J. (2011). Cadena de pre-procesamiento estándar para las imágenes Landsat del Plan Nacional de Teledetección. *Revista de Teledetección*, 36, 51-61. Obtenido de: https://www.researchgate.net/publication/236900182_Cadena_de_pre-procesamiento_estandar_para_las_imagenes_Landsat_del_Plan_Nacional_de_Teledeteccion

Congalton, R. (1991). *A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. Remote Sensing of Environment*, 37(1), 35-46. Obtenido de: https://doi.org/10.1016/0034-4257(91)90048-B

Coronel, R. (2022). *Análisis multitemporal de la cobertura vegetal y uso del suelo en el área de influencia de la carretera Gualaceo - Plan de Milagro en el periodo 2013-2020 para la definición de zonas prioritarias de restauración ecológica.* [Tesis para obtener el grado de magister en Recursos Naturales. Universidad Politécnica Salesiana. Obtenido de: https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/24029

Choudhary, P., Devatha, C., & Azhoni, A. (2025). Integration of multi-layer perceptron neural network and cellular Automata-Markov chain approach for the prediction of land use land cover in land change modeler. *Ecological Modelling,* 506. Obtenido de: https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2025.111162

De Ricky P. (2021). [Vista de cobertura y uso de suelo de herbazal denso]. Google Maps. Obtenido de: https://www.google.com/maps/@-11.9684764,-75.1700216,3a,44.5y,60.83h,80.35t/data=!3m8!1e1!3m6!1sAF1QipNY0bemm0XfBofSVZndRFfiaCz0PDfnEw6tiM-C!2e10!3e11!6shttps:%2F%2Flh3.googleusercontent.com%2Fp%2FAF1QipNY0bemm0XfBofSVZndRFfiaCz0PDfnEw6tiM-C%3Dw900-h600-k-no-pi9.650000000000006-ya63.829999999999984-ro0-fo100!7i9216!8i3886?authuser=0&entry=ttu&g_ep=EgoyMDI1MDMxOS4yIKXMDSoASAFQAw%3D%3D

De la cruz, N. (2023). *Variabilidad espacio-temporal de la cobertura glaciar del nevado Huaytapallana y su relación con los elementos climáticos precipitación y temperatura durante el periodo 1986-2022, Junín, Perú.* [Tesis para optar el título de ingeniero topógrafo]. Universidad Privada del Norte. Obtenido de: https://repositorio.upn.edu.pe/item/08c8da72-3f10-47a3-b754-e70ae997ba34

Eastman, J. (2012). *IDRISI Selva Tutorial.* Clark Labs. Obtenido de: http://uhulag.mendelu.cz/files/pagesdata/eng/gis/idrisi_selva_tutorial.pdf

Environmental Systems Research Institute - ESRI. (2016). *The ArcGIS Imagery Book New View, New Vision*. Esri Press. Obtenido de: https://www.esri.com/content/dam/esrisites/en-us/esri-press/book-pages/sample-page/the-arcgis-imagery-book-companion-resource.pdf

Eshita A., Luke J., Jasmeet, L., Ahsanullah, S., Chandana, M., (2024). Projection of land use and land cover changes based on land change modeler and integrating both land use land cover and climate change on the hydrological response of Big Creek Lake Watershed, South Alabama. *Journal of Environmental Management,* 370. Obtenido de https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479724029098

Farfán, M., Rodríguez, G. & Francois, G. (2015). Análisis jerárquico de la intensidad de cambio de cobertura/uso de suelo y deforestación (2000-2008) en la Reserva de la Biosfera Sierra de Manantlán, México. *Investigaciones Geográficas*, 2016 (90), 89-104. Obtenido de: https://www.elsevier.es/es-revista-investigaciones-geograficas-boletin-del-instituto-118-pdf-S0188461116300383

Feizizadeh, B., Darabi, S., Blaschke, T. & Lakes, T. (2022). QADI as a New method and alternative to Kappa for accuracy assessment of remote sensing-based image classification. *Sensors,* 22(12), 4506. Obtenido de: https://doi.org/https://doi.org/10.3390/s22124506

Fonollosa, J., Sunyer, A., Sallán, J. & Fernández, V. (2016). *Cadenas de Markov: métodos cuantitativos para la toma de decisiones III*. Iniciativa Digital Politécnica. Obtenido de: https://doi.org/10.5821/ebook-9788498806113

Gallardo, D., & Montes, R. (2021). E*stimación de la variabilidad espacio temporal de la cobertura vegetal por la expansión urbana en la Loma de Carabayllo.* [Tesis para optar el título de ingeniero geógrafo]. Universidad Nacional Mayor de San Marcos]. Obtenido de: https://cybertesis.unmsm.edu.pe/handle/20.500.12672/17721

Gaur, S., & Singh, R. (2023). A comprehensive review on Land Use/Land Cover (LULC) change modeling for urban development: current status and future prospects. *Sustainability,* 15(2). Obtenido de: https://doi.org/10.3390/su15020903

Gobierno Regional de Junín. (2015a). *Memoria descriptiva del estudio de uso actual de las tierras del departamento de Junín a escala 1:10000*. Obtenido de: https://geoservidor.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2017/06/Memoria_Descriptiva_Suelos_CUM-junin-2.pdf

Gobierno Regional de Junín. (2015b). *Memoria descriptiva del estudio de cobertura vegetal del departamento de Junín a escala 1:100 000*. Obtenido de: https://geoservidor.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2017/06/Memoria_Descriptiva_Vegetacion-junin.pdf

Gobierno Regional de Junín. (2015c). *Memoria descriptiva Zonificación Ecológica y Económica del departamento de Junin a nivel meso y escala 1: 100 000*. Obtenido de: https://geoservidor.minam.gob.pe/zee-aprobadas/junin/

Gobierno Regional de Junín. (2021). *Plan Maestro del área de conservación Regional Huaytapallana 2021-2025*. Obtenido de: https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/2485685/RESOLUCION%20EJECUTIVA%20REGIONAL%20213.PDF.PDF

Gómez, Á. & Gómez, K. (2019). *Muestreo estadístico para docentes y estudiantes.* (1ra ed.). Obtenido de: https://tauniversity.org/sites/default/files/ebook_muestreo_estadistico_para_docentes_y_estudiantes._dr._angel_gomez_degraves_y_prof._karine_gomez_marquina.pdf

Gonzales, L. & Romero, Á. (2013). *Análisis multitemporal de los cambios de la cobertura de la tierra e incidencia del cultivo de palma en el territorio del municipio de Villanueva*. [Tesis para optar el título de magister en gestión ambiental]. Pontifica Universidad Javeriana. Obtenido de: https://repository.javeriana.edu.co/handle/10554/13495

Granados, A. (2023). *La expansión urbana de la ciudad de Huancayo y su repercusión en el uso sostenible del suelo del Valle del Mantaro (1944-2022*). [Tesis para

obtener el grado de magíster en gestión y auditorías ambientales]. Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas. Obtenido de: https://repositorioacademico.upc.edu.pe/handle/10757/668679

Granja, A. (2020). *Detección de cambios de uso y cobertura de los bosques utilizando clasificación directa de cambios y post – clasificación*. [Tesis para obtener el grado de magister en geomática]. Universidad Nacional de la Plata. Obtenido de: https://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/134915

Haller, A. (2017). Los impactos del crecimiento urbano en los campesinos andinos. Un estudio de percepción en la zona rural-urbana de Huancayo, Perú. *Espacio y desarrollo*, (29), 37-56. Obtenido de: https://doi.org/10.18800/espacioydesarrollo.201701.002

Hernández, R. & Mendoza, C. (2018). *Metodología de la investigación: Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta*. Mc Graw Hill Education. Obtenido de: https://doi.org/https://doi.org/10.22201/fesc.20072236e.2019.10.18.6

Hernández, R., Hernández, C., Baptista, M. (2014). *Metodología de la investigación.* (6ta ed.). Mc Graw Hill Education.

Idrogo, A. (2022). *Análisis de cambios de cobertura y uso de la tierra con imágenes satelitales del distrito de Sócota - Cutervo, periodo 2002-2017*. [Tesis para obtener el grado de ingeniero agrónomo]. Universidad Nacional de Cajamarca. Obtenido de: https://repositorio.unc.edu.pe/handle/20.500.14074/4995

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM. (s.f). *Metodología Corine Land Cover*. Obtenido el 24 marzo del 2024 de: http://www.ideam.gov.co/web/ecosistemas/metodologia-corine-land-cover

Instituto Nacional de Estadística e Informática - INEI. (2018). *Censos Nacionales 2017: XII de Población, VII de Vivienda y III de Comunidades Indígenas*. Obtenido de: https://censo2017.inei.gob.pe/resultados-definitivos-de-los-censos-nacionales-2017/

Instituto Nacional de Estadística e Informática - INEI. (s.f.). *Sistema de información distrital para la gestión pública*. Obtenido el 02 de junio del 2025 de: https://estadist.inei.gob.pe/map

Instituto Nacional de Estadística e Informática - INEI. (s.f.). *Consultar información de los censos realizados por el INEI*. Obtenido el 02 de junio del 2025 de: https://www.gob.pe/36495-consultar-informacion-de-los-censos-realizados-por-el-inei-censos-nacionales-de-poblacion-y-vivienda

Instituto Nacional de Estadística e Informática - INEI. (2021). *Catálogo de metadatos – Insittuto Nacional de Estadística e Informática*. Obtenido el 02 de junio del 2025 de: https://metadatogis.inei.gob.pe/geonetwork/srv/spa/catalog.search;jsessionid=F1

E5F12A306E56F2E49667B61F7DB768#/metadata/857d9c69-117f-41d3-9762-a592a8256e1b

Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña – INAIGEM. (2023). *Memoria descriptiva del inventario nacional de bofedales del perú 2023*. Obtenido de: https://sinia.minam.gob.pe/documentos/inventario-nacional-bofedales-peru-2023#:~:text=Los%20bofedales%20son%20humedales%20altoandinos,delimitar%20y%20clasificar%20los%20bofedales.

Iván, E. (2020). [Vista de cobertura y uso de suelo de herbazal denso]. Google Maps. Obtenido de: https://www.google.com/maps/@-11.927934,-75.1995194,3a,75y,317.83h,73.45t/data=!3m8!1e1!3m6!1sAF1QipMROjZTDuEYmTRE-Z-xYD5mAGncayJ_bRrYZPqE!2e10!3e11!6shttps:%2F%2Flh3.googleusercontent.com%2Fp%2FAF1QipMROjZTDuEYmTRE-Z-xYD5mAGncayJ_bRrYZPqE%3Dw900-h600-k-no-pi16.554961858991163-ya200.82799878085893-ro0-fo100!7i10752!8i4766?authuser=0&entry=ttu&g_ep=EgoyMDI1MDIyNS4wIKXMDSoASAFQAw%3D%3D

Jaramillo, L., Manchero, A., Guzman, A. & Mollocana, J. (2025) Análisis y predicción del cambio de uso y cobertura de suelo en el Corredor de Conectividad Llanganates-Sangay para 2030. *La Granja*, 41 (1), 11-32. Obtenido de: https://www.redalyc.org/journal/4760/476081405001/html/

Ji, P., Su, R., Wu, G., Xue, L., Zhang, Z., Fang, H., Gao, R., Zhang, W. & Zhang, D. (2025). Projecting Future Wetland Dynamics Under Climate Change and Land Use Pressure: A Machine Learning Approach Using Remote Sensing and Markov Chain Modeling. *Remote Sensing*, 17 (6). Obtenido de: https://doi.org/10.3390/rs17061089

Kumar, S., Midya, K., Ghosh, S., Kumar, P. & Nayaran, V. (2025). Land use change analysis and prediction of urban growth using multi-layer perceptron neural network Markov chain model in Faridabad- A data-scarce region of Northwestern India. *Physics and Chemistry of the Earth*, 138. Obtenido de: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1474706525000348

Lambin, E., Helmut, J., & Lepers, E. (2003). Dynamics of land - use and land - cover change in tropical regions. *Annual Review of Environment and Resources*, 28, 205-241. Obtenido de: https://doi.org/10.1146/annurev.energy.28.050302.105459

Lara, A. (2014). *Capítulo 10 cadenas de Markov. Universidad de Granada*. Departamento de estadística. Obtenido del: https://ugr.es/~bioestad/_private/cpfund10.pdf

López, A., Ríos, M., Flamenco, A. & Gutierrez, M. (2018) Análisis y modelación espacial de los patrones de deforestación (2005-2025) en la microcuenca La Unión del municipio de Chiapa de Corzo, Chiapas. *Sociedad y Ambiente*, (18), 117-143, Obtenido de: https://www.redalyc.org/journal/4557/455757584005/html/

Lopez, M. (2022). *Análisis del cambio multitemporal de la cobertura y uso de tierras en el área de influencia del alud de 1970: Ranrahirca - Yungay periodo 1970-2020*. [Tesis para optar el grado de ingeniero ambiental]. Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo. Obtenido de: https://repositorio.unasam.edu.pe/item/e985c4f8-c853-4559-b478-1771cab2f663

López, L. & Monterroso, A. (2024). Intensidad en los cambios de uso de suelo en México (2001-2018). *Investigaciones Geográficas*, (115). Obtenido de: https://doi.org/10.14350/rig.60878

Lu, D. & Weng, Q. (2007). A survey of image classification methods and techniques for improving classification performance. *International Journal of Remote Sensing*, 28(5), 823-870. Obtenido de: https://doi.org/10.1080/01431160600746456

Maquera, E. (2020). *Análisis de los cambios de cobertura y uso del suelo en el departamento de Tacna periodo 2007, 2012 y 2017*. [Tesis para optar el grado de magíster en ciencias con mención en gestión ambiental y desarrollo sostenible]. Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann. Obtenido de: https://repositorio.unjbg.edu.pe/items/0edbc6e9-764b-4458-9a48-e83559eda3ac

Marín, J. (2005). *Cadenas de Markov*. Universidad Carlos III de Madrid. Obtenido de: https://halweb.uc3m.es/esp/Personal/personas/jmmarin/esp/PEst/tema4pe.pdf

Martínez, J., & Martín, M. (2010). *Guía didáctica de teledetección y medio ambiente*. Red Nacional de Teledetección. (1ra ed.) Obtenido de: https://www.aet.org.es/files/guia_teledeteccion_medio_ambiente.pdf

Maurya, R., Negi, V., & Pandey, B.(2021). Spatio-temporal analysis of land use/land cover change through overlay technique in Kinnaur district of Himachal pradesh, Western Himalaya. *Sustainability, Agri, Food and Environmental Research,* 9(1), 50-65. Obtenido de: https://safer.uct.cl/index.php/SAFER/article/view/228

Medina, E. (2021). *Cambio de cobertura de la tierra en la subcuenca del Yacus en el período 1990/2020, provincia de Jauja, Departamento de Junín. [Tesis para optar el título profesional de ingeniero ambiental]. Universidad César Vallejo*. Obtenido de: https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/61999

Ministerio de Cultura - MINCUL (s.f.). *BDPI Base de datos de Pueblos Indígenas u Originarios*. Obtenido el 21 de junio del 2025 de: https://bdpi.cultura.gob.pe/mapa-interactivo

Ministerio del Ambiente - MINAM. (2011). *Decreto Supremo Nº 018-2011-MINAM que establece el Área de Conservación Regional Huaytapallana.* Diario Oficial El Peruano. Obtenido de: https://www.minam.gob.pe/disposiciones/decreto-supremo-n-018-2011-minam/

Ministerio del Ambiente - MINAM. (2014). *Protocolo de evaluación de la exactitud temática del mapa de deforestación.* Obtenido de: https://repositoriodigital.minam.gob.pe/handle/123456789/928

Ministerio del Ambiente - MINAM. (2015). *Mapa nacional de cobertura vegetal memoria descriptiva*. Obtenido de: https://www.gob.pe/institucion/minam/informes-publicaciones/2674-mapa-nacional-de-cobertura-vegetal-memoria-descriptiva

Ministerio del Ambiente- MINAM. (2016). *Resolución Ministerial Nº 081-2016-MINAM Procedimiento técnico para la elaboración del "Estudio especializado de análisis de los cambios de la cobertura y uso de la tierra"*. Diario Oficial El Peruano. Obtenido de: https://www.minam.gob.pe/disposiciones/resolucion-ministerial-n-081-2016-minam/

Ministerio de Vivienda Construcción y Saneamiento - MVCS (2015). *Plan de desarrollo urbano de Huancayo 2015 -2025*. Obtenido de: https://apuntesdearquitecturadigital.blogspot.com/2019/10/plan-de-desarrollo-urbano-de-huancayo.html

Morales, G. (2021). *Dinámicas periurbanas prospectivas del cambio de coberturas del sistema socio-ecológico del suelo de conservación de la Ciudad de México*. [Tesis para optar el grado de magíster en ciencias de información geoespacial]. Centro de Investigación en Ciencias de Información Geoespacial CentroGeo. Obtenido de: https://centrogeo.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1012/340

Montero, A. & Viales R. (2015). Teoría del cambio en el paisaje a partir del cambio del uso de la tierra y la cobertura del suelo (enfoque LUCC). Su utilidad para la historia ambiental. *Revista Reflexiones*, 94 (2), 25-33. Obtenido de: https://archivo.revistas.ucr.ac.cr/index.php/reflexiones/article/view/25385/25625

Mucha, D. (2020). *Análisis de la variación de cobertura y uso actual de tierras de la subcuenca Cunas durante el periodo 1987 -2017.* [Tesis para optar el título profesional de ingeniero ambiental]. Universidad Continental. Obtenido de: https://repositorio.continental.edu.pe/handle/20.500.12394/8451

Municipalidad distrital de El Tambo (2022). *Plan de Desarrollo Local Concertado del distrito de El Tambo 2022-2032*. Obtenido de: https://www.gob.pe/institucion/munieltambo/informes-publicaciones/3945453-plan-de-desarrollo-concertado-pdc

Municipalidad distrital de El Tambo (14 de enero del 2024). *Reseña Histórica*. Obtenido de: https://www.gob.pe/36746-municipalidad-distrital-de-el-tambo-resena-historica

Municipalidad provincial de Huancayo (2017a). *Plan de Acondicionamiento Territorial de Huancayo*. Municipalidad provincial de Huancayo.

Municipalidad provincial de Huancayo (2017b). P*lan de Desarrollo Metropolitano de Huancayo 2017 - 2037*. Municipalidad provincial de Huancayo.

National Aeronautics and Space Administration - NASA. (s.f.). *LANDSAT 8 BANDS*. Obtenido el 01 de octubre de 2023 de: https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/landsat-8/landsat-8-bands/

National Aeronautics and Space Administration - NASA. (s.f.). *LANDSAT 9*. Obtenido el 26 de agosto de 2023 de: https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/landsat-9/

National Aeronautics and Space Administration - NASA. (s.f.). *Satellites*. Obtenido el 8 de octubre de 2023 de: https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/

National Aeronautics and Space Administration - NASA. (s.f). *THEMATIC MAPPER (TM).* Obtenido el 29 de agosto de 2023 de: https://landsat.gsfc.nasa.gov/thematic-mapper/

Navarro, R., Gonzales, P., Varo, M. & Ariza, A. (2024). *Geociencias aplicadas a la gestión forestal.* Editorial Universidad de Córdoba. Obtenido de: https://www.uco.es/servicios/ucopress/producto/isbn-9788499278193/

Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación - FAO. (2015). *Estado mundial del recurso suelo: Resumen técnico*. Obtenido de: https://openknowledge.fao.org/items/7bd0e196-b0a7-44d7-b3d3-9aa39cd75cbf

Organización de las Naciones Unidad para la Agricultura y Alimentación - FAO. (2020). *Alimentación y agricultura sostenibles*. Obtenido de: https://www.fao.org/sustainability/news/detail/es/c/1279267/

Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático - IPCC. (2016). *Manual para el sector del uso de la tierra, cambio de uso de la tierra y silvicultura (UTCUTS)*. Obtenido de: https://unfccc.int/sites/default/files/11-bis-handbook-on-lulucf-sector.pdf

Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático - IPCC. (2020). *El cambio climático y la tierra*. Obtenido de: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/4/2020/06/SRCCL_SPM_es.pdf

Pabón, D. (2022). *Análisis de los procesos de cambio de uso y cobertura del suelo en la microcuenca del río Tabacay*. [Tesis para optar el grado de magíster en investigación en cambio climático, sustentabilidad y desarrollo]. Universidad Andina Simón Bolívar. Obtenido de: http://hdl.handle.net/10644/8687

Pacosonco, J. (2024). *Propuesta de un plan de revegetación del pasivo ambiental del proyecto minero AFC-14, Pampilla – Ananea - Puno 2023*. [Tesis para optar el título de ingeniero ambiental]. Universidad Privada San Carlos. Obtenido de: https://repositorio.upsc.edu.pe/handle/UPSC/891

Pérez, N. (2021). *Estimación de la deforestación en el Santuario Histórico Bosque de Pómac y su zona de amortiguamiento mediante modelos estocásticos y teledetección*. [Tesis para optar el título de ingeniero geógrafo]. Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Obtenido de: https://cybertesis.unmsm.edu.pe/item/72b1c68a-364f-4e39-a62f-92c6d32e1c3d

Plata, M. & Fuentes, J. (2023). *Análisis del crecimiento urbano para la identificación de cambios del uso del suelo por medio de la teledetección, datos geográficos y demográficos. Caso de estudio corregimiento de La Gabarra entre los años 2005 a 2022* [Tesis para optar el título de ingeniero topógrafo]. Universidad Unidades Tecnológicas de Santander. Obtenido de: http://repositorio.uts.edu.co:8080/xmlui/handle/123456789/11919

Pontius Jr, R. G., & Millones, M. (2011). Death to Kappa: birth of quantity disagreement and allocation disagreement for accuracy assessment. *International Journal of Remote Sensing*, 32(15), 4407- 4429.Obtenido de: https://doi.org/10.1080/01431161.2011.552923

Rene (2022). [Vista de cobertura y uso de suelo glaciar]. Google Maps. https://www.google.com/maps/@-11.9251599,-75.0614158,3a,75y,32.31h,91.76t/data=!3m8!1e1!3m6!1sAF1QipPvytkQaygKI4r77T-nBSGCUGdeAM571vtghYqv!2e10!3e11!6shttps:%2F%2Flh3.googleusercontent.com%2Fp%2FAF1QipPvytkQaygKI4r77T-nBSGCUGdeAM571vtghYqv%3Dw900-h600-k-no-pi-1.7639658765430823-ya274.31299220648333-ro0-fo100!7i6144!8i3072?authuser=0&entry=ttu&g_ep=EgoyMDI1MDIyNS4wIKXMDSoASAFQAw%3D%3D

Reyna, G. (2022). *Percepción ciudadana sobre las externalidades positivas y negativas del boom inmobiliario en la ciudad de Huancayo, 2021*. [Tesis para optar el grado de magíster en responsabilidad social, relaciones comunitarias y gestión de conflictos]. Universidad Nacional del Centro del Perú. Obtenido de: https://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12894/8762/T010_43671588_M.pdf?sequence=1

Rodríguez, A., Rubiano, S., Gutiérrez, V., Albert, J., Bernal, R., Jaime, H., Rodríguez, H., Nubia, S., Arguello, O., Pulido, C., Sandra, X. (2013). *Cobertura vegetal y uso del suelo de la altillanura plana de los municipios de Puerto López y Puerto Gaitán, Meta: Escala 1:25 000*. Obtenido de: http://hdl.handle.net/20.500.12324/1267

Romero, H., & Vásquez, A. (2005). Evaluación ambiental del proceso de urbanización de las cuencas del piedemonte andino de Santiago de Chile. *Revista EURE – Revista Latinoamericana de Estudios Urbanos Regionales*, 31(94), 97-118. Obtenido de: https://www.eure.cl/index.php/eure/article/view/1342

Romero, J. (2021). *Propagación vegetativa de esquejes de queñua (Polylepis incana) con la aplicación de dos enraizadores naturales y tres tipos de sustratos en condiciones de vivero Región Junín* [Tesis para optar el título de ingeniero

agrónomo]. Universidad José Carlos Mariategui. Obtenido de: https://repositorio.ujcm.edu.pe/handle/20.500.12819/1353

Rosero, M. (2018). *Análisis multitemporal del uso del suelo y cobertura vegetal de la cuenca del Río Tahuando y proyección de cambios al año 2031, en el cantón Ibarra, provincia de Imbabura*. [Tesis para optar el grado de magíster en gestión ambiental en cuencas hidrográficas]. Universidad Técnica del Norte. Obtenido de: https://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/7745

Rojas, A. (2025). *Evaluación de las condiciones ambientales y antrópicas asociadas al cambio de cobertura y uso del suelo en el distrito Pozuzo para el año 2050*. [Tesis para optar el título de ingeniero ambiental]. Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión. Obtenido de: http://45.177.23.200/handle/undac/5878

Sánchez, O. (2024) *La expansión urbana y su relación con la dinámica agrícola en el valle del Mantaro 1999-2022*. [Tesis para optar el grado de magíster en ciencias con mención en proyectos de inversión]. Universidad Nacional de Ingeniería]. Obtenido de: http://hdl.handle.net/20.500.14076/28221

Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú - Senamhi (2011). *Componente hidrológica: determinación de la disponibilidad hídrica presente y futura – subcuenca del río Shullcas*. Obtenido de: https://repositorio.senamhi.gob.pe/handle/20.500.12542/3232

Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú - Senamhi (2021). *Mapa climático del Perú.* Obtenido el 07 de enero del 2025 de: https://www.senamhi.gob.pe/?p=mapa-climatico-del-peru

Soubry, I. & Guo, X. (2021). Identification of the optimal season and spectral regions for shrub cover estimation in Grasslands. *Sensors*, 21(9). Obtenido de: https://doi.org/10.3390/s21093098

Sopla, L. (2023). *Análisis de la cobertura vegetal del distrito de Quinjalca-Amazonas en el período 2000-2020 y su proyección futura*. [Tesis para optar el título de ingeniero topógrafo y agrimensor]. Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas. Obtenido de: https://repositorio.untrm.edu.pe/handle/20.500.14077/3804

Subia, Y. (2020). *Análisis multitemporal de cambio de cobertura vegetal y uso de suelos en el parque nacional Bahuaja Sonene y su zona de amortiguamiento.* [Tesis para optar el título de ingeniero topógrafo y agrimensor]. Universidad Nacional del Altiplano. Obtenido de: https://repositorio.unap.edu.pe/handle/20.500.14082/14781

Tinoco, J. (2024). *Cambio de cobertura y uso de suelo en la provincia de Huancayo, periodo 2000 -2021* [Tesis para optar el título de ingeniero forestal y ambiental]. Universidad Nacional del Centro del Perú. Obtenido de: https://repositorio.uncp.edu.pe/handle/20.500.12894/11253

Toribio, S. (2023). *Análisis del efecto espacio - temporal del retroceso glaciar del nevado Huaytapallana en los bofedales del Área de Conservación Regional Huaytapallana en el periodo de 1990-2020, Junín - 2022*. [Tesis para optar el título profesional de ingeniero ambiental]. Universidad Continental. Obtenido de: https://repositorio.continental.edu.pe/handle/20.500.12394/13020

Toby, N. & David, A. (1997). On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index. *Remote Sensing of Environment*, 62(3), 241 - 252. Obtenido de: https://doi.org/10.1016/S0034-4257(97)00104-1

Tunque, R. (2023). *Análisis multitemporal de la superficie glaciar y su influencia en la disponibilidad hídrica en la subcuenca Shullcas.* [Tesis para optar el título profesional de ingeniero ambiental]. Universidad Nacional Federico Villareal. Obtenido de: https://repositorio.unfv.edu.pe/handle/20.500.13084/7607

Vega, C. & Espinoza, M. (2024). *Cambios espaciotemporales en la cobertura y uso del suelo, y su efecto en el valor económico de los servicios ecosistémicos de Huaraz e Independencia*. Obtenido de: https://peru.mapbiomas.org/wp-content/uploads/sites/14/2024/08/CJ_003_CristhianVega_MariluEspinoza_ArticuloCientifico.pdf

Witting, N. (2019). *Cambio de cobertura y uso del suelo en diferentes periodos a partir del uso de imágenes satelitales en el distrito de Codo del Pozuzo, Huánuco*. [Tesis para optar el título profesional de ingeniero en recursos naturales renovables]. Universidad Agraria de la Selva. Obtenido de: http://epositorio.unas.edu.pe/handle/20.500.14292/1507

Yaringaño, M. (2019). *Plan de ordenamiento ambiental de la subcuenca Shullcas - provincia de Huancayo - departamento de Junín*. [Tesis para optar el título profesional de ingeniero ambiental]. Universidad Nacional Federico Villareal. Obtenido de: https://repositorio.unfv.edu.pe/handle/20.500.13084/3822

Zumaeta, D. (2019). *Análisis multitemporal y predictivo del cambio de uso del suelo y pérdida de cobertura vegetal en la microcuenca Yuyac, Amazonas, 2018.* [Tesis para optar el título profesional de ingeniero ambiental]. Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazona. Obtenido de: https://hdl.handle.net/20.500.14077/1986

Yauri, L. (2019). *Valoración de los servicios ecosistémicos culturales del bosque dorado mediante costo de viaje, Paccha, El Tambo – Huancayo*. [Tesis para optar el título profesional de ingeniero forestal y ambiental]. Obtenido de: https://repositorio.uncp.edu.pe/items/5503f961-5060-4084-81c6-2eaca5bc2c78

ANEXOS

Anexo 1. Leyenda Corine Land Cover adaptada para Perú

Nivel I	Nivel II	Nivel III	Nivel IV	Definición nivel II
1. Áreas artificializadas	1.1 Áreas urbanizadas	1.1.1 Tejido urbano continuo		Las áreas urbanizadas incluyen los espacios cubiertos por infraestructura urbana y todas aquellas áreas verdes y redes de comunicación asociadas con ella, que configuran un tejido urbano.
		1.1.2 Tejido urbano discontinuo		
	1.2 Áreas industriales e infraestructura	1.2.1 áreas Industriales o comerciales		Comprende áreas cubiertas por infraestructura de uso exclusivamente comercial, industrial, de servicios y comunicaciones. Se incluyen tanto las instalaciones como las redes de comunicaciones que permiten el desarrollo de los procesos específicos de cada actividad.
		1.2.2 Red vial, ferroviaria y terrenos asociados		
		1.2.3 áreas portuarias		
		1.2.4 aeropuertos		
		1.2.5 Obras hidráulicas		
	1.3 Áreas de extracción de minería e hidrocarburos y escombreras	1.3.1 áreas de extracción de minería e hidrocarburos		Comprende las áreas donde se extraen o acumulan materiales asociados con actividades mineras e hidrocarbuiferas, de construcción, producción industrial y vertimiento de residuos de diferente origen. (Incluye colas y desmontes).
		1.3.2 áreas de disposición de residuo		
	1.4 áreas verdes artificiales no agrícolas	1.4.1 áreas verdes urbana		Comprende las áreas verdes localizadas en las zonas urbanas, sobre las cuales se desarrollan actividades comerciales, recreacionales, de conservación y amortiguación donde los diferentes usos no requieren de infraestructura construida apreciable. En general, estas áreas verdes son el resultado de procesos de planificación urbana o áreas que por los procesos de urbanización quedaron embebidas en el perímetro de la ciudad
		1.4.2 Instalaciones recreativas		
2. Áreas Agrícolas	2.1 Cultivos transitorios			Tienen como característica fundamental, que después de la cosecha es necesario volver a sembrar o plantar para seguir produciendo. Comprende las áreas ocupadas con cultivos cuyo ciclo vegetativo es generalmente corto (hasta 2 años), llegando incluso a ser sólo de unos pocos mede, como por ejemplo los cereales (maíz, trigo, cebada y arroz), los tubérculos (papa y yuca), las oleaginosas (el ajonjolí y el algodón), la mayor parte de las hortalizas, algunas especies de flores de cielo abierto.
	2.2 Cultivos permanentes			Comprende los territorios dedicados a los cultivos cuyo ciclo vegetativo es mayor a dos años, produciendo varias cosechas sin necesidad de volverse a plantar; se incluyen en esta categoría los cultivos industriales de caña, los cultivos de herbáceas como plátano y banano; los cultivos arbustivos como café y cacao; y los cultivos arbóreos como palma africana y árboles frutales
	2.3 Pastos			Comprende las tierras cubiertas con hierba densa de composición floristas dominad principalmente por las familias Poacae y Fabacae, dedicadas a pastoreo permanente por un periodo de 2 o más años. Algunas de las categorías definidas pueden presentar anegamientos temporales o permanentes

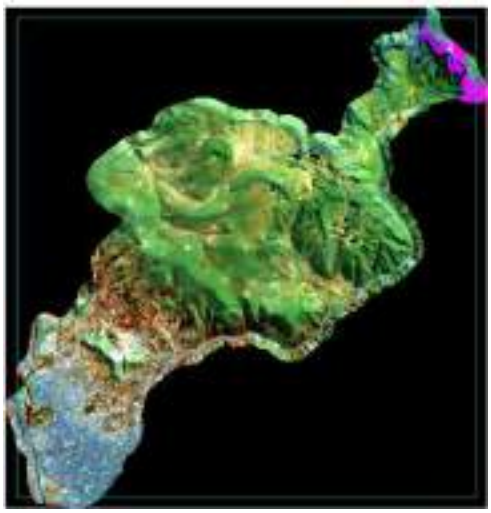
Nivel I	Nivel II	Nivel III	Nivel IV	Definición nivel II
				cuando están ubicadas en zonas bajas o en depresiones del terreno. Una característica de esta cobertura es que en un alto porcentaje su presencia se debe a la acción antrópica, referida especialmente a su plantación, con la introducción de especies no nativas principalmente y en el manejo posterior que se hace.
	2.4 áreas agrícolas heterogéneas			Con unidades que se reúnen dos o más categorías de cobertura agrícolas y naturales. Están, dispuestas en un patrón intrincado de mosaicos geométricas que hace difícil su separación en coberturas individuales; los arreglos geométricos están relacionados con el tamaño reducido de los predios, las condiciones locales de los suelos, las prácticas de manejo utilizadas y las formas locales de tendencia de la tierra. 70% intervenido en la UMN. Si el % es menor, la cobertura continua define a la matriz.
3. Bosques y áreas mayormente naturales/ Á	3.1 Bosque	3.1.1 Bosque denso bajo		Altura mayor a 5m. Cobertura mayor a 10%. Umbral entre denso y abierto: 70% de cobertura. Los bosques riparios y otros ecológicamente discernibles entrarían como nivel 4. Se consideran excepciones importantes definidas por restricciones bioclímicas y biogeográficas (particularmente en Perú y Bolivia), como los bosques de Polylepis o Prosopis
		3.1.2 Bosque abierto bajo		
		3.1.3 Bosque denso alto		
		3.1.4 Bosque abierto alto		
		3.1.5 Bosque fragmentado		
	3.2 Bosques Plantados			Son coberturas constituidas por plantaciones de vegetación arbórea, realizada por la intervención directa del hombre con fines de manejo forestal. En este proceso se constituyen rodales forestales, establecidos mediante la plantación y/o la siembra durante el proceso de forestación o reforestación, para la producción de madera (plantaciones comerciales) o de bienes y servicios ambientales (plantaciones protectoras).
	3.3 áreas con vegetación herbácea y/o arbustivo	3.3.1 Herbazal	3.1.1.1 Herbazal denso 3.1.1.2 Herbazal abierto	Cobertura constituida por una comunidad vegetal dominada por elementos típicamente herbáceos desarrollados en forma natural en diferentes densidades y sustratos, los cuales forman una cobertura densa (>70 % de ocupación) o abierta (30 % - 70 % de ocupación). Una hierba es una planta no lignificada o apenas lignificada, de manera que tiene consistencia blanda en todos sus órganos. tanto subterráneos como epigeos (Font Queur, 1982). Estas formaciones vegetales no han sido intervenidas o sus intervenciones han sido selectivas y no ha alterado su estructura original y las características funcionales (IGAC,1999)
		3.3.2 Arbustal	3.1.1.1 Arbustal denso 3.1.1.2 Arbustal abierto	Comprende los territorios cubiertos por vegetación arbustiva desarrollados en forma natural en diferentes densidades y sustratos Un arbusto es una planta perenne, con estructura de tallo leñoso, con una altura entre 0,5 y 2, fuertemente ramificado en la base y sin copa definida (FAO, 2001).
		3.3.3 Vegetación secundaria o transición		Comprende aquella cobertura vegetal originada por el proceso de sucesión de la vegetación natural que se presenta luego de la intervención o por la destrucción de la

Nivel I	Nivel II	Nivel III	Nivel IV	Definición nivel II
				vegetación primaria, que se puede encontrarse en recuperación tendiendo al estado original. Se desarrolla en zonas desmontadas para diferentes usos, en áreas agrícolas abandonadas y en zonas donde por la ocurrencia de eventos naturales la vegetación natural fue destruida. No se presentan elementos intencionalmente introducidos por el hombre.
		3.3.4 Vegetación arbustiva/ herbácea	3.1.4.1 Vegetación arbustiva / herbácea densa 3.1.1.2 Vegetación arbustiva / herbácea abierta	Comprende los territorios cubiertos por una mezcla de vegetación arbustiva y herbácea, desarrollados en forma natural en diferentes densidades y sustratos.
		3.3.5 Arbustal / área intervenida 3.3.6 Herbazal / área intervenid 3.3.7 Arbustal - Herbazal / área intervenida		
	3.4 áreas sin o con poca vegetación	3.4.1 áreas arenosas naturales		Comprende aquellos territorios en los cuales vegetal no existe o escasea, compuestas principalmente por suelos desnudos y quemados, así como por coberturas arenosas y afloramientos rocosos, algunos de los cuales pueden estar cubiertos por hielo y nieve.
		3.4.2 Afloramientos rocosos		
		3.4.3 Tierras desnudas (incluyen áreas erosionadas naturales y también degradadas) (TD)		
		3.4.4 Áreas quemadas		
		3.4.5 Glaciares		
		3.4.6 Solares		
4. áreas	4.1 áreas húmedas continentales	4.4.1 Áreas pantanosas		
		4.1.2 Turberas y bofedales		
		4.1.3 Vegetación acuática sobre cuerpos de agua		

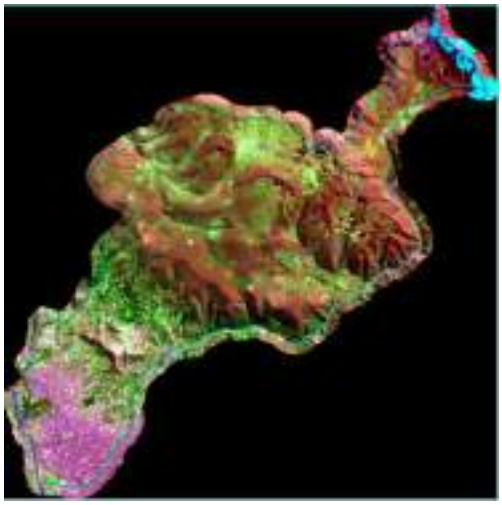
Fuente: Informe Final del Proyecto Análisis de las Dinámicas de Cambio de Cobertura de la Tierra en la Comunidad Andina (Arnillas et al., 2012).

Anexo 2. Combinaciones RGB de las imágenes satelitales

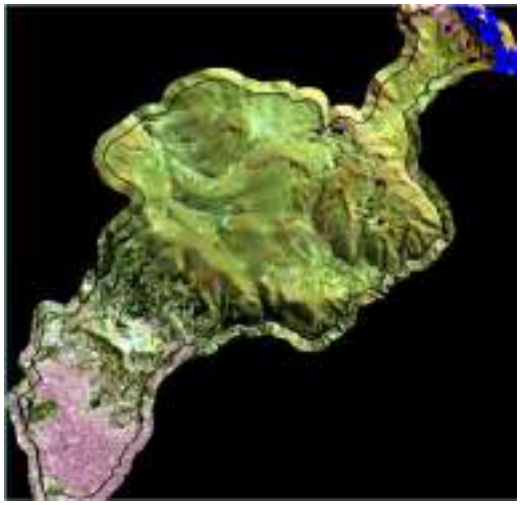
Landsat 8 RGB 543/ Landsat 5 RGB 432



Landsat 8 RGB 564/ Landsat 5 RGB 453

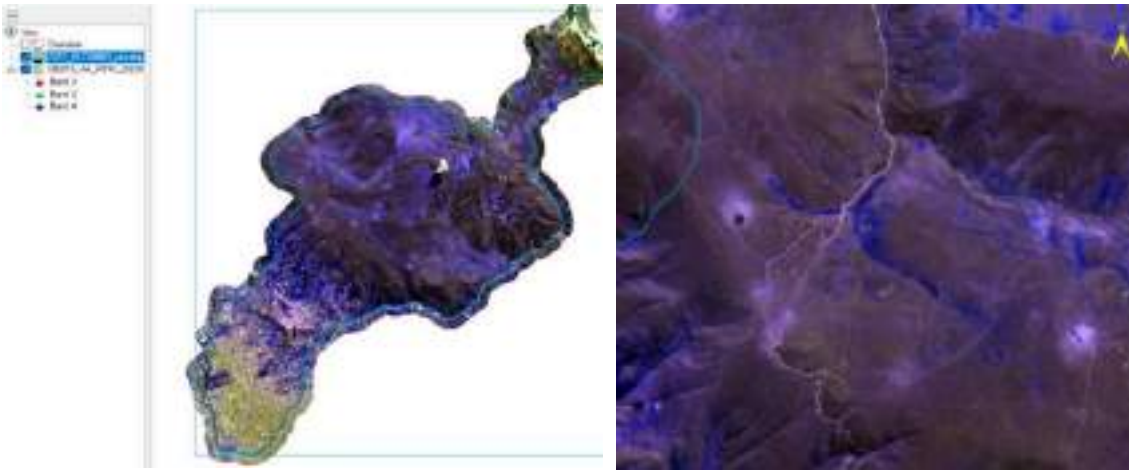


Landsat 8 RGB 753/ Landsat 5 RGB 742



Landsat 8 RGB 764/ Landsat 5 RGB 753

<u>Combinación RGB 324 de la imagen CBERS del año 2023</u>



Anexo 3. Fichas de identificación de coberturas y uso de suelo – puntos representativos

FICHA DE CAMPO				NÚMERO	01
RESPONSABLE:	Betsy de la Cruz		FECHA:	25/05/2024	
COORDENADAS GPS:	ESTE (m):	474 394	HORA:	17:30	
	NORTE (m):	8 667 537	DATUM:	WGS84	
	ALTITUD (m s. n. m.)	3 256	ZONA UTM:	18	
INFORMACIÓN DE LA UBICACIÓN POLÍTICA					
DEPARTAMENTO:	Junín		PROVINCIA:	Huancayo	
DISTRITO:	El Tambo				
INFORMACIÓN DE LA COBERTURA Y USO DE SUELO					
CATEGORIA CLC	Áreas Urbanizadas		NIVEL CLC	II	
CÓDIGO GABINETE	AUR		NÚMERO GABINETE	1	
DESCRIPCIÓN/ OBSERVACIONES	Punto tomado en la zona llamada “Caminito de Huancayo”.				
FOTOGRAFÍAS					
ORIENTACIÓN: Noroeste					
ORIENTACIÓN: Noreste					

FICHA DE CAMPO				NÚMERO	02
RESPONSABLE:	Betsy de la Cruz		FECHA:	08/06/2024	
COORDENADAS GPS:	ESTE (m):	478 662	HORA:	15:08	
	NORTE (m):	8 671 901	DATUM:	WGS84	
	ALTITUD (m s. n. m.)	3 596	ZONA UTM:	18	
INFORMACIÓN DE LA UBICACIÓN POLÍTICA					
DEPARTAMENTO:	Junín		PROVINCIA:	Huancayo	
DISTRITO:	El Tambo				
INFORMACIÓN DE LA COBERTURA Y USO DE SUELO					
CATEGORÍA CLC	Cultivos transitorios		NIVEL CLC	II	
CÓDIGO GABINETE	CULT		NÚMERO GABINETE	2	
DESCRIPCIÓN/ OBSERVACIONES	Punto tomado en una zona de cultivo de papa, considerando el mes en el que se visitó el lugar, coincidió con la temporada de cosecha de los cultivos, por ello las fotografías muestran el suelo removido. Además, se observa la vegetación con apariencia seca ya que los meses de abril a setiembre no hay lluvia.				
FOTOGRAFÍAS					
ORIENTACIÓN: Noroeste					
ORIENTACIÓN: Noreste			ORIENTACIÓN: Noreste		

FICHA DE CAMPO				NÚMERO	03
RESPONSABLE:	Betsy de la Cruz		FECHA:	08/06/2024	
COORDENADAS GPS:	ESTE (m):	481 104	HORA:	12:30	
	NORTE (m):	8 672 882	DATUM:	WGS84	
	ALTITUD (m s. n. m.)	3 689	ZONA UTM:	18	
INFORMACIÓN DE LA UBICACIÓN POLÍTICA					
DEPARTAMENTO:	Junín		PROVINCIA:	Huancayo	
DISTRITO:	El Tambo				
INFORMACIÓN DE LA COBERTURA Y USO DE SUELO					
CATEGORIA CLC	Bosque		NIVEL CLC	II	
CÓDIGO GABINETE	BOS		NÚMERO GABINETE	3	
DESCRIPCIÓN/ OBSERVACIONES	Punto tomado en bosque de Aliso.				
FOTOGRAFÍAS					
ORIENTACIÓN: Suroeste					

FICHA DE CAMPO				NÚMERO	04
RESPONSABLE:	Betsy de la Cruz		FECHA:	26/05/2024	
COORDENADAS GPS:	ESTE (m):	478 427	HORA:	13:01	
	NORTE (m):	8 674 757	DATUM:	WGS84	
	ALTITUD (m s. n. m.)	3 732	ZONA UTM:	18	
INFORMACIÓN DE LA UBICACIÓN POLÍTICA					
DEPARTAMENTO:	Junín		PROVINCIA:	Huancayo	
DISTRITO:	El Tambo				
INFORMACIÓN DE LA COBERTURA Y USO DE SUELO					
CATEGORIA CLC	Bosque		NIVEL CLC	II	
CÓDIGO GABINETE	BOS		NÚMERO GABINETE	3	
DESCRIPCIÓN/ OBSERVACIONES	Lugar conocido como "Bosque Dorado" el cual es reconocido por albergar principalmente Queñuales, aunque también hay arboles de Aliso y se observaron ejemplares arbóreos jóvenes de Eucaliptos.				
FOTOGRAFÍAS					
ORIENTACIÓN: Sur					

FICHA DE CAMPO				NÚMERO	05
RESPONSABLE:	Betsy de la Cruz		FECHA:	02/06/2024	
COORDENADAS GPS:	ESTE (m):	480 911	HORA:	14:05	
	NORTE (m):	8 673 989	DATUM:	WGS84	
	ALTITUD (m s. n. m.)	3 958	ZONA UTM:	18	
INFORMACIÓN DE LA UBICACIÓN POLÍTICA					
DEPARTAMENTO:	Junín		PROVINCIA:	Huancayo	
DISTRITO:	El Tambo				
INFORMACIÓN DE LA COBERTURA Y USO DE SUELO					
CATEGORIA CLC	Bosque		NIVEL CLC	II	
CÓDIGO GABINETE	BOS		NÚMERO GABINETE	3	
DESCRIPCIÓN/ OBSERVACIONES	Lugar conocido como "Parque Ecológico de los Pinos – Cochas Chico" cual se caracteriza por tener plantaciones forestales de pino.				
FOTOGRAFÍAS					
ORIENTACIÓN: Sureste					
ORIENTACIÓN: Noreste					

FICHA DE CAMPO				NÚMERO	06
RESPONSABLE:	Betsy de la Cruz		FECHA:	26/05/2024	
COORDENADAS GPS:	ESTE (m):	479 420	HORA:	15:50	
	NORTE (m):	8 676 721	DATUM:	WGS84	
	ALTITUD (m s. n. m.)	4 201	ZONA UTM:	18	
INFORMACIÓN DE LA UBICACIÓN POLÍTICA					
DEPARTAMENTO:	Junín		PROVINCIA:	Huancayo	
DISTRITO:	El Tambo				
INFORMACIÓN DE LA COBERTURA Y USO DE SUELO					
CATEGORIA CLC	Herbazal abierto		NIVEL CLC	IV	
CÓDIGO GABINETE	HERA		NÚMERO GABINETE	4	
DESCRIPCIÓN/ OBSERVACIONES	Punto tomado en la zona llamada “Caminito de Huancayo”.				
FOTOGRAFÍAS					
ORIENTACIÓN: Norte					
ORIENTACIÓN: Noreste			ORIENTACIÓN: Este		

FICHA DE CAMPO				NÚMERO	07
RESPONSABLE:	Betsy de la Cruz		FECHA:	Mayo 2021	
COORDENADAS GPS:	ESTE (m):	479 102	HORA:	-	
	NORTE (m):	8 680520	DATUM:	WGS84	
	ALTITUD (m s. n. m.)	3 985	ZONA UTM:	18	
INFORMACIÓN DE LA UBICACIÓN POLÍTICA					
DEPARTAMENTO:	Junín		PROVINCIA:	Huancayo	
DISTRITO:	El Tambo				
INFORMACIÓN DE LA COBERTURA Y USO DE SUELO					
CATEGORIA CLC	Herbazal denso		NIVEL CLC	IV	
CÓDIGO GABINETE	HERD		NÚMERO GABINETE	5	
DESCRIPCIÓN/ OBSERVACIONES	Fotografías tomadas de Google Maps. El lugar es conocido como hacienda Suytucancha.				

FOTOGRAFÍAS

ORIENTACIÓN: Este

ORIENTACIÓN: Oeste

ORIENTACIÓN: Norte

ORIENTACIÓN: Sur

Fuente: Google Maps, propiedad de Ricky P. (2021). Link: https://www.google.com/maps/@-11.935956,-75.1919632,3a,75y,301.07h,72.39t/data=!3m8!1e1!3m6!1sAF1QipPKF8gd6-tJT32ZmDVvQM16EIN5vxOSj8mD6t60!2e10!3e11!6shttps:%2F%2Flh3.googleusercontent.com%2Fp%2FAF1QipPKF8gd6-tJT32ZmDVvQM16EIN5vxOSj8mD6t60%3Dw900-h600-k-no-pi17.61130979872766-ya352.0671148570476-ro0-fo100!7i8704!8i4352?authuser=0&entry=ttu&g_ep=EgoyMDI1MDIyNS4wIKXMDSoASAFQAw%3D%3D

FICHA DE CAMPO				NÚMERO	08
RESPONSABLE:	Betsy de la Cruz		FECHA:	08/06/2024	
COORDENADAS GPS:	ESTE (m):	477 316	HORA:	16:52	
	NORTE (m):	8 673 289	DATUM:	WGS84	
	ALTITUD (m s. n. m.)	3 439	ZONA UTM:	18	
INFORMACIÓN DE LA UBICACIÓN POLÍTICA					
DEPARTAMENTO:	Junín		PROVINCIA:	Huancayo	
DISTRITO:	El Tambo				
INFORMACIÓN DE LA COBERTURA Y USO DE SUELO					
CATEGORIA CLC	Afloramientos rocosos y tierras desnudas		NIVEL CLC	III	
CÓDIGO GABINETE	AR-TD		NÚMERO GABINETE	16	
DESCRIPCIÓN/ OBSERVACIONES	Área sin vegetación				
FOTOGRAFÍAS					
ORIENTACIÓN: Suroeste					
ORIENTACIÓN: Este					

FICHA DE CAMPO				NÚMERO	09
RESPONSABLE:	Betsy de la Cruz		FECHA:	08/06/2024	
COORDENADAS GPS:	ESTE (m):	479 288	HORA:	15:46	
	NORTE (m):	8 675 869	DATUM:	WGS84	
	ALTITUD (m s. n. m.)	4 089	ZONA UTM:	18	
INFORMACIÓN DE LA UBICACIÓN POLÍTICA					
DEPARTAMENTO:	Junín		PROVINCIA:	Huancayo	
DISTRITO:	El Tambo				
INFORMACIÓN DE LA COBERTURA Y USO DE SUELO					
CATEGORIA CLC	Afloramientos rocosos y tierras desnudas		NIVEL CLC	III	
CÓDIGO GABINETE	AR-TD		NÚMERO GABINETE		
DESCRIPCIÓN/ OBSERVACIONES	Punto tomado en la zona llamada “Caminito de Huancayo”.				
FOTOGRAFÍAS					

FICHA DE CAMPO				NÚMERO	10
RESPONSABLE:	Betsy de la Cruz		FECHA:	17/11/2024	
COORDENADAS GPS:	ESTE (m):	479 412	HORA:	15:50	
	NORTE (m):	8 677 822	DATUM:	WGS84	
	ALTITUD (m s. n. m.)	4 102	ZONA UTM:	18	
INFORMACIÓN DE LA UBICACIÓN POLÍTICA					
DEPARTAMENTO:	Junín		PROVINCIA:	Huancayo	
DISTRITO:	El Tambo				
INFORMACIÓN DE LA COBERTURA Y USO DE SUELO					
CATEGORIA CLC	Turberas y bofedales		NIVEL CLC	II	
CÓDIGO GABINETE	BOF		NÚMERO GABINETE	1	
DESCRIPCIÓN/ OBSERVACIONES	Punto tomado en bofedal				
FOTOGRAFÍAS					
ORIENTACIÓN: Este					

FICHA DE CAMPO				NÚMERO	11
RESPONSABLE:	Betsy de la Cruz		FECHA:	02/06/2024	
COORDENADAS GPS:	ESTE (m):	487 817	HORA:	12:11	
	NORTE (m):	8 674 234	DATUM:	WGS84	
	ALTITUD (m s. n. m.)	3 970	ZONA UTM:	18	
INFORMACIÓN DE LA UBICACIÓN POLÍTICA					
DEPARTAMENTO:	Junín		PROVINCIA:	Huancayo	
DISTRITO:	El Tambo				
INFORMACIÓN DE LA COBERTURA Y USO DE SUELO					
CATEGORIA CLC	Cuerpos de agua		NIVEL CLC	III	
CÓDIGO GABINETE	AGU		NÚMERO GABINETE	9	
DESCRIPCIÓN/ OBSERVACIONES	Punto el río Shullcas que define parte del límite el distrito de El Tambo y Huancayo.				
FOTOGRAFÍAS					
ORIENTACIÓN: Suroeste					

Anexo 4. Fotografías de cobertura y uso de suelo tomados en campo

Coordenadas UTM - Zona Sur 18 S: Este: 474 534 Norte: 8 667 046 Altitud: 3251 m s. n. m.
Fecha: 25/05/2024
Descripción: Áreas urbanizadas (AUR)
Uso: Validación (Punto 1 de la tabla 1 del anexo 4).

Coordenadas UTM - Zona Sur 18 S: Este: 474 394 Norte: 8 667 537 Altitud: 3 256 m s. n. m.
Fecha: 25/05/2024
Descripción: Áreas urbanizadas (AUR)
Uso: Validación (Punto 2 de la tabla 1 del anexo 4).

Coordenadas UTM - Zona Sur 18 S: Este: 474 673 Norte: 8 668 394 Altitud: 3 272 m s. n. m.
Fecha: 25/05/2024
Descripción: Áreas urbanizadas (AUR)
Uso: Corrección

Coordenadas UTM - Zona Sur 18 S: Este: 477 167 Norte: 8 673 988 Altitud: 3 378 m s. n. m.
Fecha: 26/05/2024
Descripción: Áreas urbanizadas (AUR)
Uso: Validación (Está cerca al punto 36 de la tabla 1 del anexo 4 que tiene como coordenadas 477 164, 8673 983)

Coordenadas UTM - Zona Sur 18 S: Este: 475 706 Norte: 8665618 Altitud: 3229 m s. n. m.
Fecha: 25/05/2024
Descripción: Áreas agrícolas heterogéneas (CULT)
Uso: Validación (Está cerca al punto 51 de la tabla 1 del anexo 4 que tiene como coordenadas 475 714, 8 665 586).

Coordenadas UTM - Zona Sur 18 S: Este: 479839 Norte: 8673437 Altitud: 3697 m s. n. m.
Fecha: 02/06/2024
Descripción: Áreas agrícolas heterogéneas (CULT)
Uso: Validación (Está cerca al punto 56 de la tabla 1 del anexo 4 y que tiene como coordenadas 479 854, 8 673 456).

Coordenadas UTM - Zona Sur 18 S: Este: 477852
Norte: 8670473 Altitud: 3361 m s. n. m.
Fecha: 08/06/2024
Descripción: Áreas agrícolas heterogéneas (CULT)
Uso: Validación (Está cerca al punto 61 del anexo 4 que tiene coordenadas 477 923, 8 670 498).

Coordenadas UTM - Zona Sur 18 S: Este: 481 178
Norte: 8 673 079 Altitud: 3 732 m s. n. m.
Fecha: 08/06/2024
Descripción: Áreas agrícolas heterogéneas (CULT)
Uso: Validación el punto 62 de la tabla 1del anexo 4.

Coordenadas UTM - Zona Sur 18 S: Este: 479 056
Norte: 8 674 294 Altitud: 3713 m s. n. m.
Fecha: 02/06/2024
Descripción: Áreas agrícolas heterogéneas (CULT)
Uso: Validación (Está cerca al punto 88 de la tabla 1 del anexo 4 y que tiene como coordenadas 479 039, 8 674 255).

Coordenadas UTM - Zona Sur 18 S: Este: 477 206
Norte: 8 669 025 Altitud: 3 065 m s. n. m.
Fecha: 08/06/2024
Descripción: Áreas agrícolas heterogéneas (CULT)
Uso: Validación (Está cerca al punto 91 de la tabla 1 del anexo 4 y que tiene coordenadas 477 236, 8 669 036).

Coordenadas UTM - Zona Sur 18 S: Este: 478 662
Norte: 8 671 864 Altitud: 3 596 m s. n. m.
Fecha: 08/06/2024
Descripción: Áreas agrícolas heterogéneas (CULT)
Uso: Validación (Está cerca al punto 92 de la tabla 1 del anexo 4 y que tiene como coordenadas 478 675, 8 671 906).

Coordenadas UTM - Zona Sur 18 S: Este: 477 060
Norte: 8 672 256 Altitud: 3 525 m s. n. m.
Fecha: 8/06/2024
Descripción: Áreas agrícolas heterogéneas (CULT)
Uso: Validación (Está cerca al punto orden 93 de la tabla 1 del anexo 4 y que tiene como coordenadas 477 086, 8 672 297).

Coordenadas UTM - Zona Sur 18 S: Este: 476 323
Norte: 8 673 694 Altitud: 3 345 m s. n. m.
Fecha: 08/06/2024
Descripción: Áreas agrícolas heterogéneas (CULT)
Uso: Validación (Está cerca al punto 98 de la tabla 1 del anexo 4 y que tiene como coordenadas 476 278, 8 673 721).

Coordenadas UTM - Zona Sur 18 S: Este: 478 187
Norte: 8 675 065 Altitud: 3 668 m s. n. m.
Fecha: 26/05/2024
Descripción: Bosque (BOS)
Uso: Validación (Está cerca al punto 103 de la tabla 1 del anexo 4 y que tiene como coordenadas 478 218, 8 675 065).

Coordenadas UTM - Zona Sur 18 S: Este: 479 634
Norte: 8 674 717 Altitud: 3 827 m s. n. m.
Fecha: 02/06/2024
Descripción: Bosque (BOS)
Uso: Validación (Está cerca del punto 125 de la tabla 1 del anexo 4.

Coordenadas UTM - Zona Sur 18 S: Este: 480 441
Norte: 8 672 856 Altitud: 3 618 m s. n. m.
Fecha: 08/06/2024
Descripción: Bosque (BOS)
Uso: Validación (Está cerca al punto 123 de la tabla 1 del anexo 4 y que tiene como coordenadas 480 427, 8 672 867).

Coordenadas UTM - Zona Sur 18 S: Este: 477 084
Norte: 8 675 543 Altitud: 3 535 m s. n. m.
Fecha: 26/05/2024
Descripción: Bosque (BOS) de Aliso
Uso: Corrección

Coordenadas UTM - Zona Sur 18 S: Este: 479 232
Norte: 8 676 535 Altitud: 4 175 m s. n. m.
Fecha: 26/05/2024 **Descripción:** Herbazal abierto (HERA)
Uso: Validación del punto 154 de la tabla 1 del anexo 4.

Coordenadas UTM - Zona Sur 18 S: Este: 489 387
Norte: 8 675 423 Altitud: 4201 m s. n. m.
Fecha: 26/05/2024 **Descripción:** Herbazal abierto (HERA)
Uso: Validación del punto 158 del anexo 4.

Coordenadas UTM - Zona Sur 18 S: Este: 478 930
Norte: 8 672 077 Altitud: 3 582 m s. n. m.
Fecha: 26/05/2024 **Descripción:** Herbazal abierto (HERA)
Uso: Validación del punto 174 de la tabla 1 del anexo 4.

Coordenadas UTM - Zona Sur 18 S: Este: 479 195
Norte: 8 675 603 Altitud: 3 999 m s. n. m.
Fecha: 26/05/2024
Descripción: Herbazal abierto (HERA)
Uso: Corrección

Coordenadas UTM - Zona Sur 18 S: Este: 479 068
Norte: 8 675 638 Altitud: 3 957 m s. n. m.
Fecha: 26/05/2024
Descripción: Herbazal abierto (HERA)
Uso: Corrección

Coordenadas UTM - Zona Sur 18 S: Este: 478 656
Norte: 8 675 348 Altitud: 3 810 m s. n. m.
Fecha: 26/05/2024
Descripción: Herbazal abierto (HERA)
Uso: Corrección

Coordenadas UTM - Zona Sur 18 S: Este: 479 288
Norte: 8 675 869 Altitud: 4 089 m s. n. m.
Fecha: 26/05/2024
Descripción: Herbazal abierto (HERA)
Uso: Validación del punto 252 de la tabla 1 del anexo 4

Coordenadas UTM - Zona Sur 18 S: Este: 489 463
Norte: 8 675 398 Altitud: 3 962 m s. n. m.
Fecha: 2/06/2024
Descripción: Afloramientos rocosos y tierras desnudas (AR-TD)
Uso: Corrección

Coordenadas UTM - Zona Sur 18 S: Este: 480 741
Norte: 8 673 717 Altitud: 3 873 m s. n. m.
Fecha: 2/06/2024
Descripción: Bosque (BOS) de pinos.
Uso: Corrección

Coordenadas UTM - Zona Sur 18 S: Este: 478 912
Norte: 8 673 305 Altitud: 3 589 m s. n. m.
Fecha: 2/06/2024 Uso**:** Corrección
Descripción: Bosque (BOS) de eucaliptos.
Uso: Corrección

Coordenadas UTM - Zona Sur 18 S: Este: 478 866
Norte: 8 673 977 Altitud: 3 648 m s. n. m.
Fecha: 2/06/2024 Uso**:** Corrección
Descripción: Áreas agrícolas heterogéneas (CULT)
Uso: Corrección

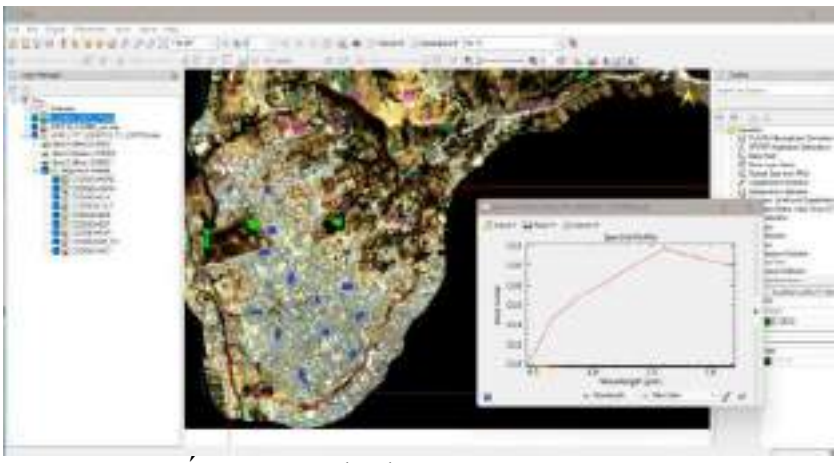
Coordenadas UTM - Zona Sur 18 S: Este: 477 013
Norte: 8 672 240 Altitud: 3 535 m s. n. m.
Fecha: 8/06/2024
Descripción: Herbazal abierto (HERA)
Uso: Corrección

Coordenadas UTM - Zona Sur 18 S: Este: 479394
Norte: 8 677 744 Altitud: 4 094 m s. n. m.
Fecha: 17/11/2024
Descripción: Herbazal abierto (HERA)

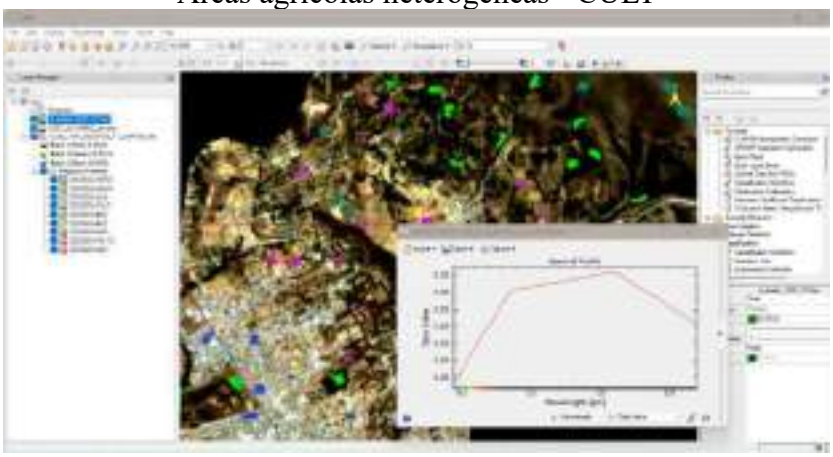
Anexo 5. Análisis de las firmas espectrales de las áreas de entrenamiento para la clasificación supervisada

Análisis de las firmas espectrales - año 2023

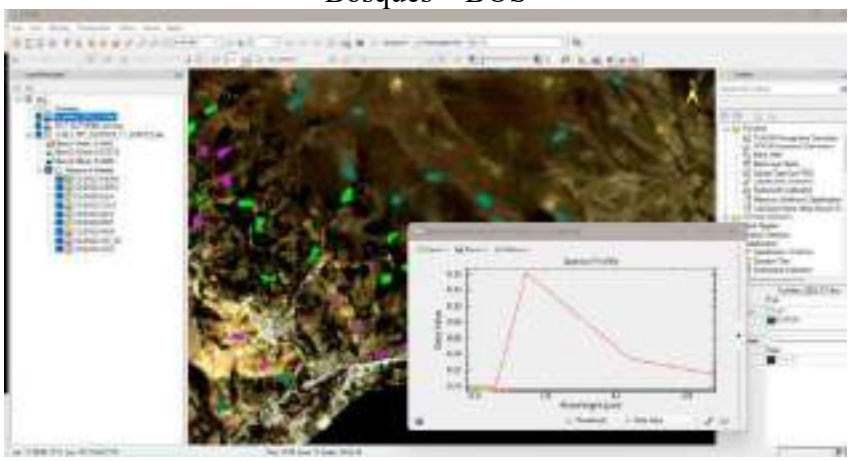
Áreas urbanas – AUR



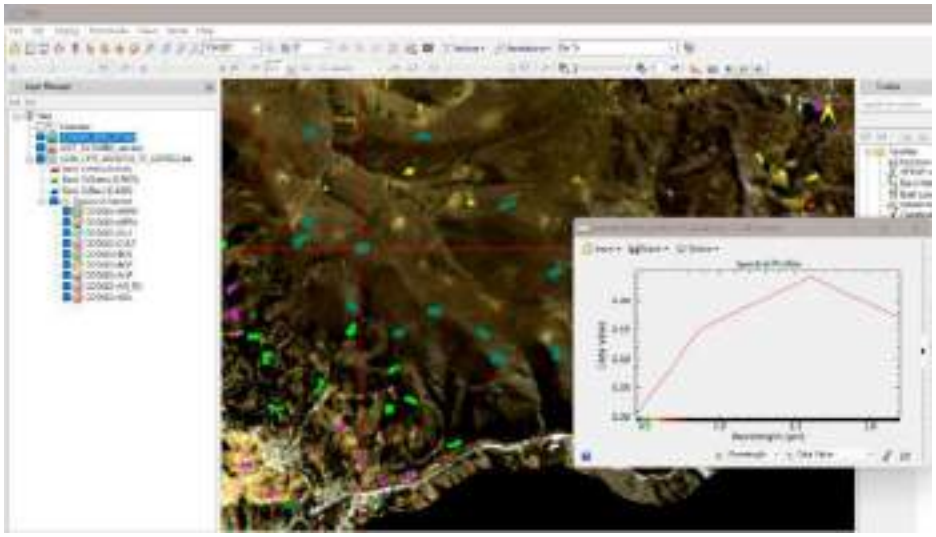
Áreas agrícolas heterogéneas - CULT



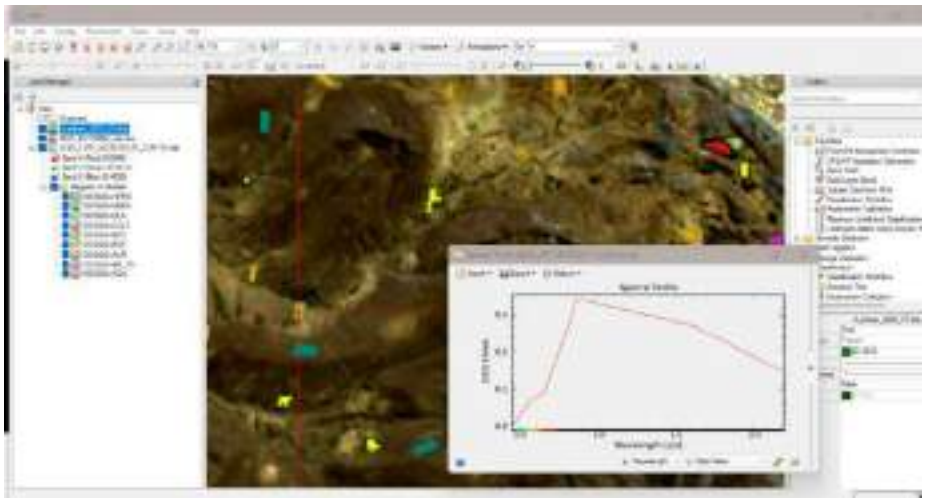
Bosques – BOS



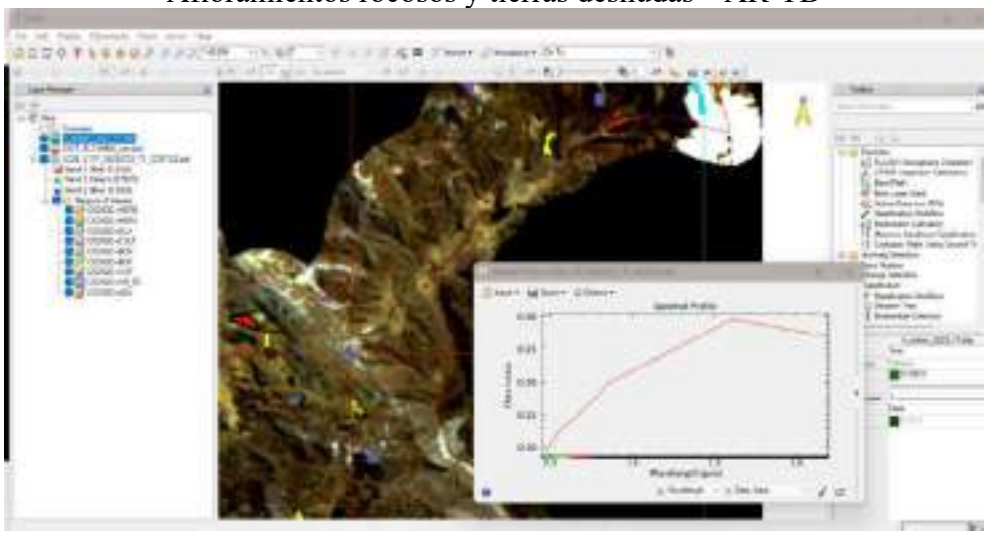
Herbazal abierto - HERA



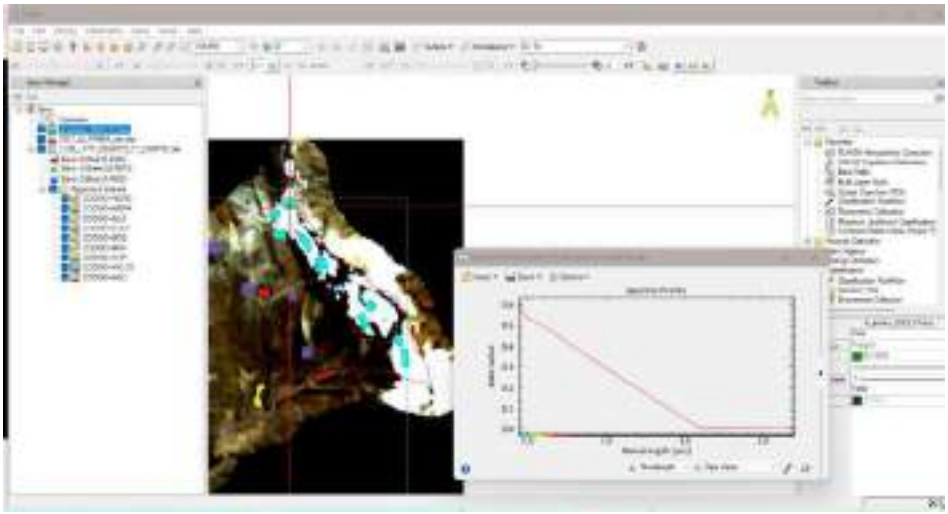
Herbazal denso – HERD



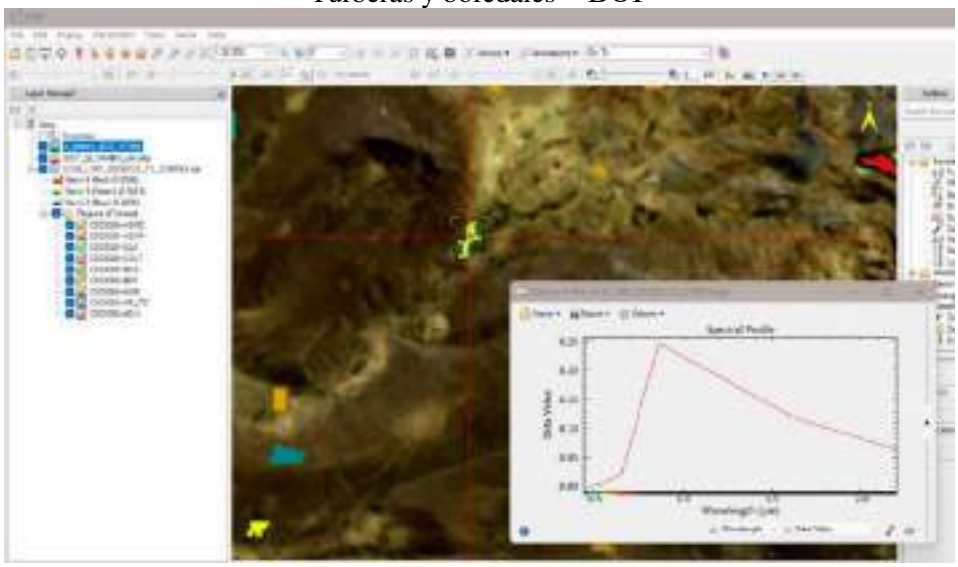
Afloramientos rocosos y tierras desnudas – AR-TD



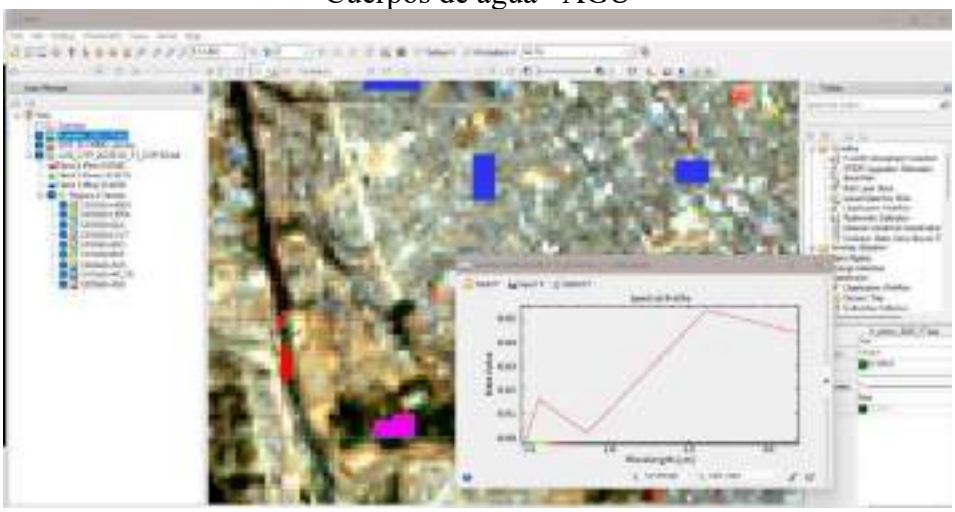
Glaciares – GLA



Turberas y bofedales – BOF

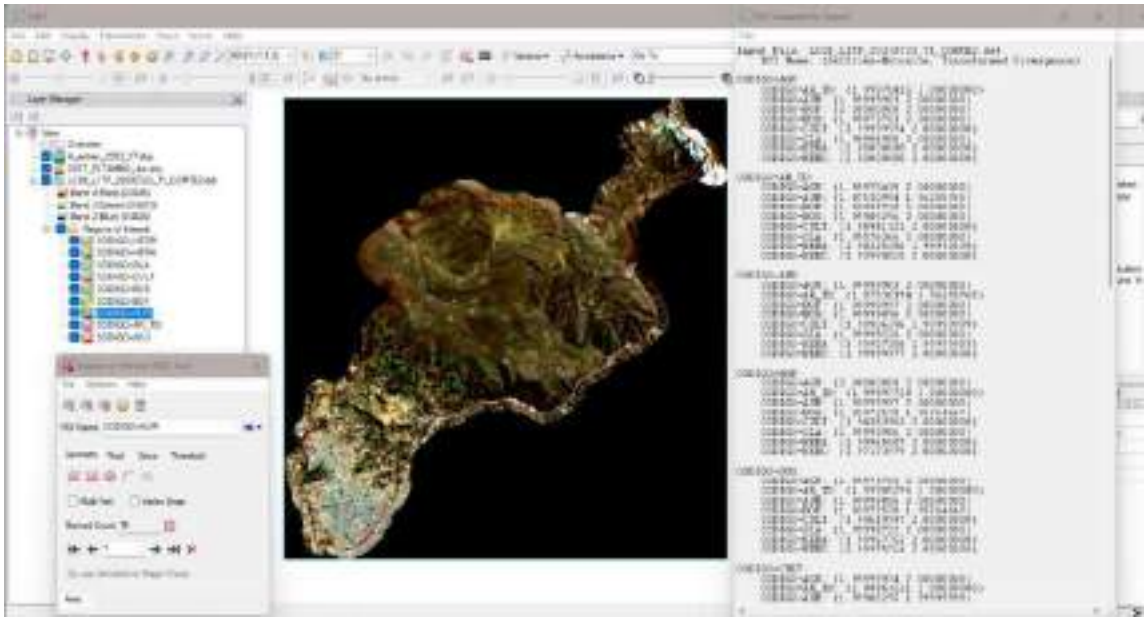


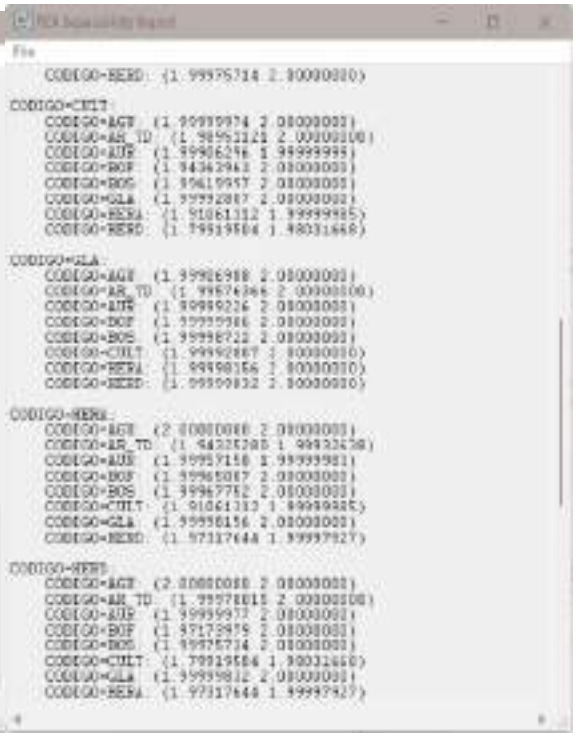
Cuerpos de agua - AGU



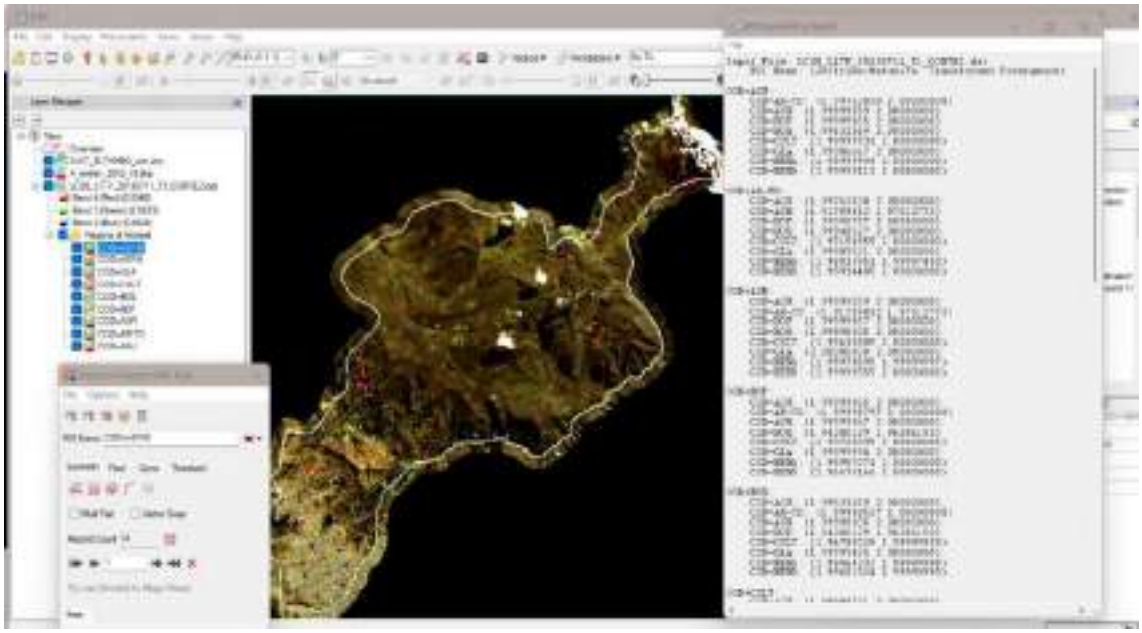
Anexo 6. Análisis de separabilidad espectral de las áreas de entrenamiento para la clasificación supervisada

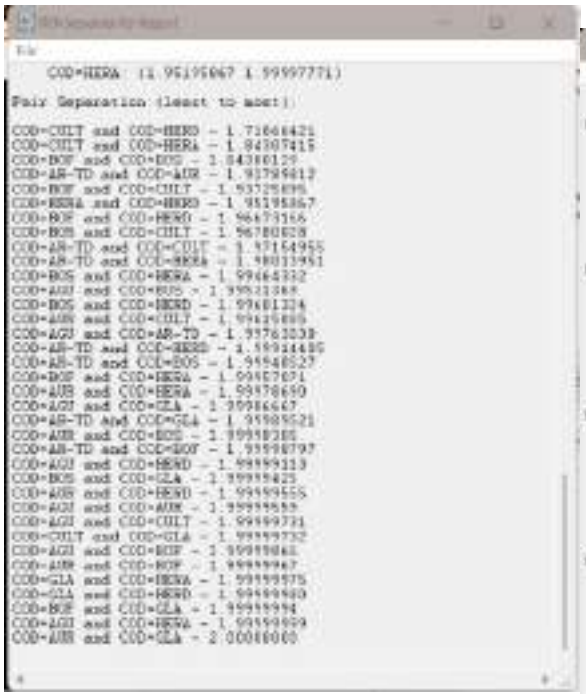
Análisis de separabilidad de Jeffries-Matusita y la Divergencia Transformada - año 2023

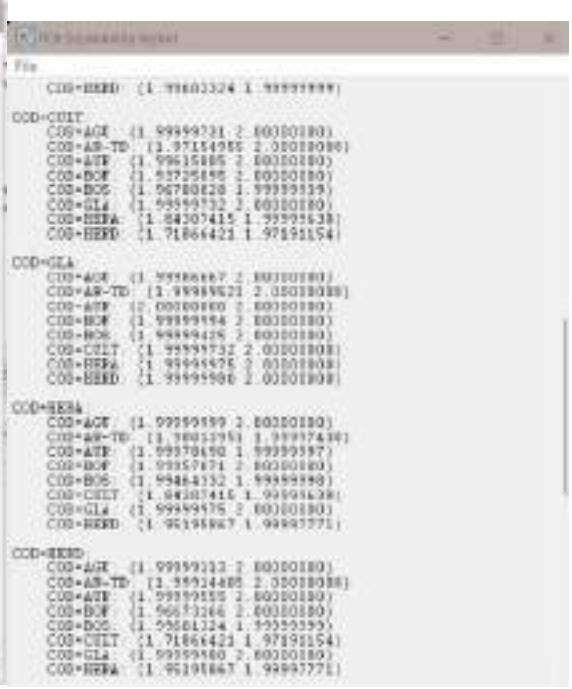




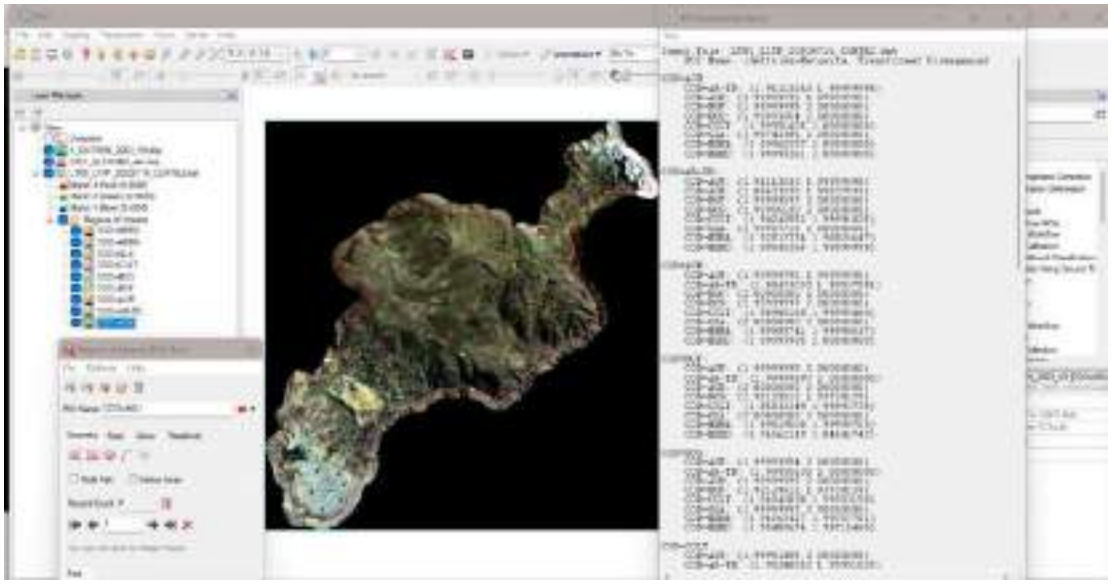
Análisis de separabilidad de Jeffries-Matusita y la Divergencia Transformada - año 2013

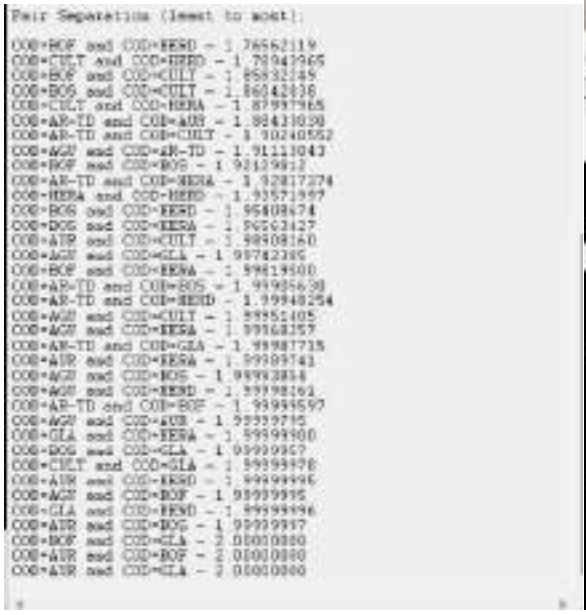


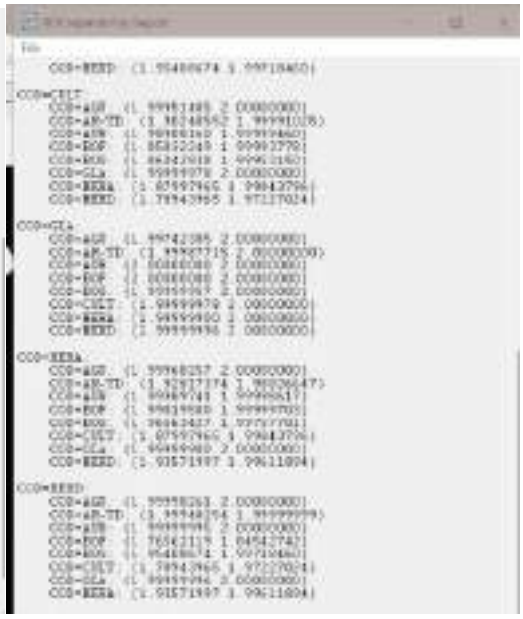




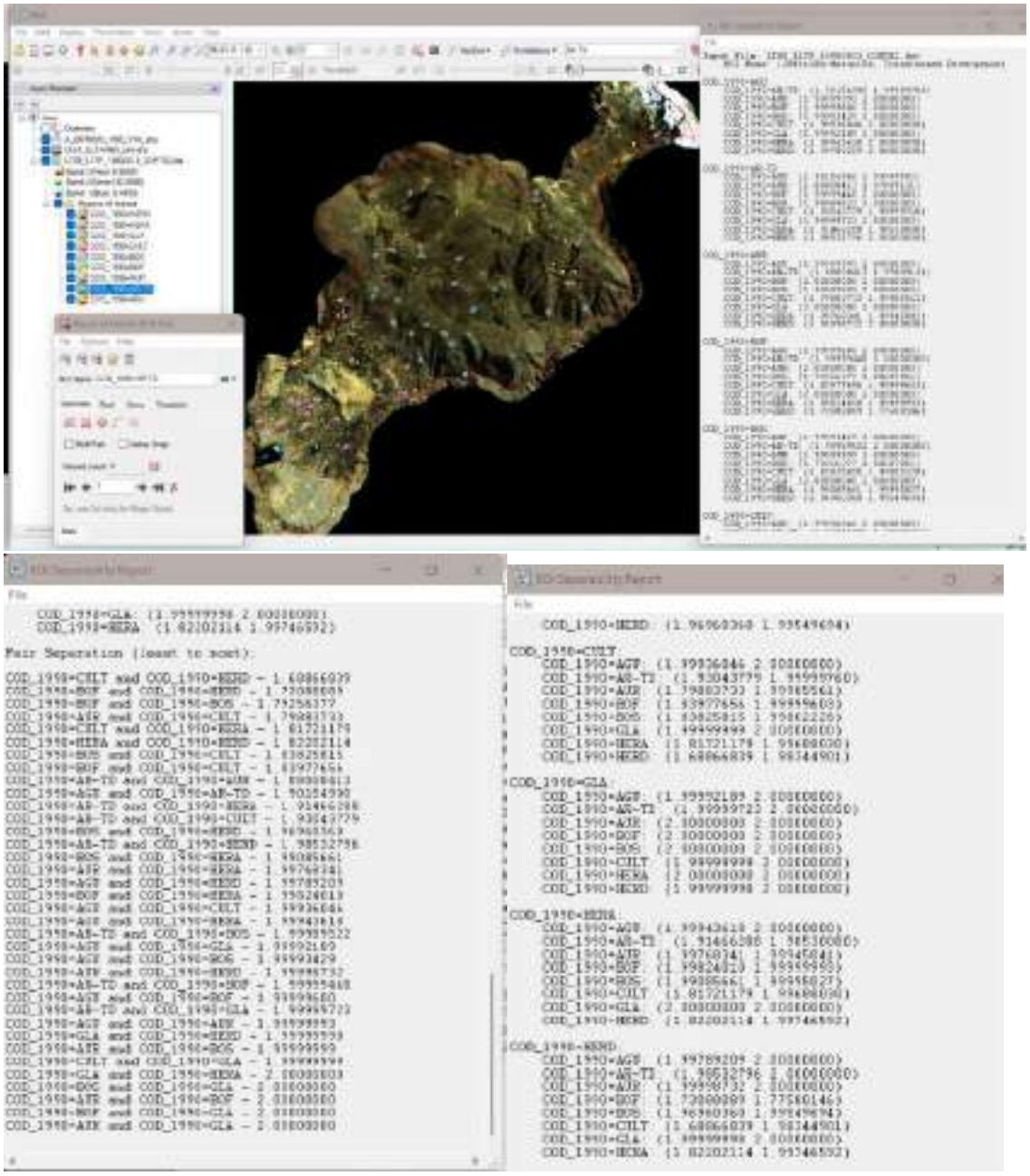
Análisis de separabilidad de Jeffries-Matusita y la Divergencia Transformada - año 2003







Análisis de separabilidad de Jeffries-Matusita y la Divergencia Transformada - año 1990



Anexo 7. Puntos de validación de la clasificación supervisada

Tabla 1. Puntos de validación para el año 2023

Orden	Coordenadas UTM (WGS 84, Zona 18 S)		Código
	Este (m)	Norte (m)	
1	474 534.00	8 667 046.00	AUR
2	474 394.00	8 667 537.00	AUR
3	474 629.00	8 668 384.00	AUR
4	476 619.00	8 674 750.00	AUR
5	476 065.37	8 667 308.73	AUR
6	475 072.00	8 667 694.00	AUR
7	476 366.00	8 668 551.00	AUR
8	475 414.00	8 669 490.00	AUR
9	476 668.62	8 667 964.90	AUR
10	477 039.03	8 667 425.15	AUR
11	475 778.00	8 667 076.00	AUR
12	475 642.00	8 666 786.00	AUR
13	476 358.08	8 667 469.99	AUR
14	476 816.78	8 667 684.44	AUR
15	476 011.00	8 667 682.00	AUR
16	474 832.40	8 667 335.19	AUR
17	474 837.00	8 667 156.00	AUR
18	475 110.00	8 666 614.00	AUR
19	474 851.00	8 667 744.00	AUR
20	474 927.65	8 668 023.11	AUR
21	475 778.00	8 670 504.00	AUR
22	474 783.00	8 670 933.00	AUR
23	474 086.28	8 670 038.71	AUR
24	474 640.00	8 670 247.00	AUR
25	478 227.00	8 673 139.00	AUR
26	479 730.00	8 671 884.00	AUR
27	479 907.00	8 671 959.00	AUR
28	477 463.00	8 674 012.00	AUR
29	474 750.00	8 669 899.00	AUR
30	476 024.00	8 673 509.00	AUR
31	475 484.00	8 670 776.00	AUR
32	474 307.40	8 670 978.65	AUR
33	475 181.00	8 670 310.00	AUR
34	473 874.00	8 670 228.00	AUR
35	474 446.00	8 668 132.00	AUR
36	477 164.00	8 673 983.00	AUR
37	476 267.00	8 666 174.00	AUR
38	475 559.00	8 668 631.00	AUR
39	476 572.00	8 666 423.00	AUR
40	475 483.00	8 666 269.00	AUR
41	475 949.00	8 666 591.00	AUR
42	476 318.00	8 666 761.00	AUR
43	476 857.00	8 666 966.00	AUR
44	475 558.00	8 667 317.00	AUR
45	475 245.00	8 671 377.00	AUR
46	476 703.00	8 668 616.00	AUR
47	478 664.00	8 672 637.00	AUR
48	475 909.00	8 670 737.00	AUR
49	476 287.00	8 670 720.00	AUR
50	475 434.00	8 666 606.00	AUR
51	475 714.00	8 665 586.00	CULT
52	474 930.00	8 665 878.00	CULT
53	474 865.00	8 666 062.00	CULT
54	481 205.00	8 672 329.00	CULT
55	481 629.00	8 672 615.00	CULT
56	479 854.00	8 673 456.00	CULT
57	479 629.00	8 673 253.00	CULT
58	478 882.00	8 673 550.00	CULT
59	479 040.00	8 673 887.00	CULT
60	478 278.00	8 670 470.00	CULT
61	477 923.00	8 670 498.00	CULT
62	481 178.00	8 673 079.00	CULT
63	479 337.00	8 672 688.00	CULT
64	480 963.90	8 673 134.95	CULT
65	481 174.00	8 672 989.00	CULT
66	479 985.00	8 672 965.00	CULT
67	480 091.00	8 672 755.00	CULT
68	480 278.00	8 672 899.00	CULT
69	480 333.00	8 672 753.00	CULT
70	479 397.00	8 672 164.00	CULT
71	479 220.00	8 671 781.86	CULT
72	477 684.00	8 672 280.00	CULT
73	477 741.00	8 672 144.00	CULT
74	478 230.00	8 671 956.00	CULT
75	477 424.00	8 673 731.00	CULT
76	477 136.00	8 673 579.00	CULT
77	476 821.00	8 674 137.00	CULT
78	476 449.00	8 674 219.00	CULT
79	476 588.00	8 673 780.00	CULT
80	475 763.00	8 673 133.00	CULT
81	476 212.00	8 672 234.00	CULT
82	476 033.00	8 672 010.00	CULT
83	476 668.00	8 674 154.00	CULT
84	476 223.00	8 671 906.00	CULT
85	477 019.00	8 671 129.00	CULT
86	474 663.00	8 671 588.00	CULT
87	477 568.00	8 670 637.00	CULT
88	479 039.00	8 674 255.00	CULT
89	479 571.00	8 673 827.00	CULT
90	479 073.00	8 673 994.00	CULT
91	477 236.00	8 669 036.00	CULT
92	478 675.00	8 671 906.00	CULT
93	477 086.00	8 672 297.00	CULT
94	477 600.00	8 672 091.00	CULT
95	477 392.00	8 672 237.00	CULT
96	478 308.00	8 672 442.00	CULT
97	477 962.00	8 673 097.00	CULT
98	476 278.00	8 673 721.00	CULT
99	474 414.00	8 672 343.00	CULT
100	476 271.00	8 673 200.00	CULT
101	474 464.00	8 665 921.00	BOS
102	477 133.00	8 675 739.00	BOS
103	478 218.00	8 675 053.00	BOS
104	478 034.00	8 674 852.00	BOS
105	478 038.00	8 674 714.00	BOS
106	490 002.00	8 675 832.00	BOS
107	488 573.00	8 675 302.00	BOS
108	488 478.00	8 674 931.00	BOS
109	487 622.00	8 674 880.00	BOS
110	487 332.00	8 674 106.00	BOS
111	487 048.00	8 673 841.00	BOS
112	486 732.00	8 673 183.00	BOS
113	486 962.00	8 673 311.00	BOS
114	474 123.00	8 669 417.00	BOS
115	485 800.00	8 672 427.00	BOS
116	485 023.00	8 672 667.00	BOS
117	484 427.00	8 672 881.00	BOS
118	482 693.00	8 673 034.00	BOS
119	483 177.00	8 672 997.00	BOS
120	482 132.00	8 672 913.00	BOS
121	480 758.60	8 674 143.52	BOS
122	480 583.00	8 674 029.00	BOS
123	480 322.00	8 673 735.00	BOS
124	480 035.00	8 673 704.00	BOS
125	479 634.00	8 674 717.00	BOS
126	479 731.00	8 674 930.00	BOS
127	479 177.00	8 674 913.00	BOS
128	479 278.00	8 675 001.00	BOS
129	482 099.00	8 673 070.00	BOS
130	480 350.00	8 673 648.00	BOS
131	480 091.46	8 673 569.13	BOS
132	480 674.00	8 672 869.00	BOS
133	480 427.00	8 672 867.00	BOS
134	478 620.00	8 673 296.00	BOS
135	479 355.00	8 672 978.00	BOS
136	473 588.00	8 669 540.00	BOS
137	474 402.00	8 671 724.00	BOS
138	477 299.00	8 674 735.00	BOS
139	477 826.00	8 675 996.00	BOS
140	478 326.00	8 673 367.00	BOS
141	479 863.00	8 674 242.00	BOS
142	478 302.00	8 673 890.00	BOS
143	481 786.00	8 672 989.00	BOS
144	480 982.00	8 673 514.00	BOS
145	478 219.00	8 668 845.00	BOS
146	478 484.00	8 673 786.00	BOS
147	478 409.00	8 674 255.00	BOS
148	481 231.00	8 672 454.00	BOS
149	480 579.00	8 672 624.00	BOS
150	478 038.00	8 671 483.00	BOS
151	474 140.00	8 668 491.00	HERA
152	478 476.00	8 674 794.00	HERA
153	479 746.00	8 676 971.00	HERA
154	479 232.00	8 676 535.00	HERA
155	480 801.76	8 676 221.39	HERA
156	481 433.13	8 676 731.69	HERA
157	480 570.00	8 677 390.00	HERA
158	479 420.00	8 676 721.00	HERA
159	482 929.00	8 676 956.00	HERA
160	489 387.00	8 675 423.00	HERA
161	480 460.00	8 673 811.00	HERA
162	480 604.00	8 673 689.00	HERA
163	480 462.00	8 673 519.00	HERA
164	484 252.00	8 675 055.00	HERA
165	480 571.00	8 674 725.00	HERA
166	479 392.00	8 674 742.00	HERA
167	483 036.00	8 675 967.00	HERA
168	483 051.00	8 677 537.00	HERA
169	477 642.00	8 671 256.00	HERA
170	486 637.00	8 678 147.00	HERA
171	483 260.00	8 679 590.00	HERA
172	489 528.00	8 680 593.00	HERA
173	481 409.00	8 673 331.00	HERA
174	478 930.00	8 672 077.00	HERA
175	478 961.00	8 671 855.00	HERA
176	476 996.00	8 673 704.00	HERA
177	476 171.00	8 674 000.00	HERA
178	485 050.00	8 677 034.00	HERA
179	482 290.00	8 681 804.00	HERA
180	474 215.00	8 668 273.00	HERA
181	479 555.00	8 676 160.00	HERA
182	480 845.67	8 675 163.72	HERA
183	478 771.00	8 681 470.00	HERA
184	487 773.76	8 674 274.13	HERA
185	486 632.00	8 673 986.00	HERA
186	480 615.19	8 673 764.58	HERA
187	489 249.00	8 677 521.00	HERA
188	484 804.00	8 677 250.00	HERA
189	478 702.00	8 671 791.00	HERA
190	478 392.00	8 671 712.00	HERA
191	476 719.00	8 672 556.00	HERA
192	476 640.94	8 672 497.07	HERA
193	477 597.00	8 671 608.00	HERA
194	479 036.00	8 679 149.00	HERA
195	480 296.00	8 681 883.00	HERA
196	481 634.00	8 680 097.00	HERA
197	480 784.00	8 678 612.00	HERA
198	481 402.00	8 675 662.00	HERA
199	484 160.00	8 676 064.00	HERA
200	485 902.00	8 673 779.00	HERA
201	489 113.00	8 676 017.00	HERA
202	488 023.00	8 678 693.00	HERA
203	483 772.00	8 680 504.00	HERA
204	488 532.00	8 676 321.00	HERA
205	484 574.00	8 682 224.00	HERD
206	483 950.00	8 682 477.00	HERD
207	483 279.00	8 682 152.00	HERD
208	484 561.00	8 681 548.00	HERD
209	483 929.00	8 679 581.00	HERD
210	484 495.00	8 679 043.00	HERD
211	484 290.00	8 678 722.00	HERD
212	483 982.00	8 678 603.00	HERD
213	484 448.00	8 678 546.00	HERD
214	483 816.00	8 678 445.00	HERD
215	484 333.00	8 678 297.00	HERD
216	483 301.00	8 681 809.00	HERD
217	483 744.00	8 682 669.00	HERD
218	484 610.00	8 682 473.00	HERD
219	485 375.00	8 682 277.00	HERD
220	484 642.00	8 681 310.00	HERD
221	485 094.00	8 682 478.00	HERD
222	485 192.00	8 682 158.00	HERD
223	486 755.00	8 680 829.00	HERD
224	486 054.00	8 680 214.00	HERD
225	483 546.00	8 681 978.00	HERD
226	483 664.00	8 682 267.00	HERD
227	484 036.00	8 682 690.00	HERD
228	482 855.00	8 678 565.00	HERD
229	487 579.00	8 675 252.00	HERD
230	486 216.00	8 674 913.00	HERD
231	485 811.00	8 675 790.00	HERD
232	488 335.00	8 677 318.00	HERD
233	485 463.00	8 677 579.00	HERD
234	481 995.00	8 676 911.00	HERD
235	485 089.00	8 675 250.00	HERD
236	488 443.00	8 677 479.00	HERD
237	479 587.00	8 680 780.00	HERD
238	481 969.00	8 677 856.00	HERD
239	478 066.00	8 680 013.00	HERD
240	478 274.71	8 681 407.44	HERD
241	481 584.00	8 677 511.00	HERD
242	481 497.10	8 681 829.84	HERD
243	483 087.00	8 681 024.00	HERD

244	484 080.00	8 680 965.00	HERD
245	480 493.00	8 679 314.00	HERD
246	479 098.10	8 680 520.97	HERD
247	479 599.00	8 679 586.00	HERD
248	480 773.00	8 679 397.00	HERD
249	482 192.00	8 681 180.00	HERD
250	485 139.00	8 681 294.00	HERD
251	483 859.00	8 681 463.00	HERD
252	479 288.00	8 675 869.00	AR-TD
253	491 403.73	8 686 307.88	AR-TD
254	491 591.00	8 686 210.00	AR-TD
255	491 498.98	8 686 085.63	AR-TD
256	492 254.64	8 685 368.08	AR-TD
257	492 191.14	8 685 158.53	AR-TD
258	488 685.93	8 680 072.17	AR-TD
259	487 568.33	8 680 662.72	AR-TD
260	485 885.57	8 681 259.62	AR-TD
261	486 063.37	8 681 342.17	AR-TD
262	486 215.00	8 681 262.00	AR-TD
263	490 177.48	8 677 800.63	AR-TD
264	490 484.39	8 677 419.63	AR-TD
265	491 404.44	8 685 875.37	AR-TD
266	487 012.00	8 681 716.00	AR-TD
267	488 409.79	8 680 843.90	AR-TD
268	488 134.00	8 680 915.00	AR-TD
269	487 547.00	8 681 324.00	AR-TD
270	493 304.70	8 684 533.36	AR-TD
271	491 727.14	8 685 723.35	AR-TD
272	491 268.00	8 686 517.00	AR-TD
273	491 267.82	8 685 278.59	AR-TD
274	490 881.53	8 686 352.80	AR-TD
275	490 099.36	8 684 278.35	AR-TD
276	490 289.86	8 684 773.12	AR-TD
277	491 810.00	8 684 020.00	AR-TD
278	488 651.00	8 683 030.00	AR-TD
279	488 799.00	8 682 854.00	AR-TD
280	489 805.00	8 679 193.00	AR-TD
281	490 076.00	8 678 230.00	AR-TD
282	491 783.84	8 686 838.74	GLA
283	491 961.64	8 686 749.84	GLA
284	492 291.84	8 686 210.09	GLA
285	492 926.84	8 685 619.53	GLA
286	492 901.44	8 685 454.43	GLA
287	493 416.00	8 684 953.00	GLA
288	493 422.14	8 685 340.13	GLA
289	493 546.00	8 684 689.00	GLA
290	493 786.00	8 684 805.00	GLA
291	493 859.00	8 684 608.00	GLA
292	493 894.58	8 684 383.82	GLA
293	493 631.00	8 684 472.00	GLA
294	493 799.00	8 684 307.00	GLA
295	493 982.00	8 684 203.00	GLA
296	493 973.00	8 684 296.00	GLA
297	493 289.00	8 685 229.00	GLA
298	493 149.00	8 685 546.00	GLA
299	493 095.00	8 685 756.00	GLA
300	491 721.42	8 686 695.02	GLA
301	492 811.00	8 685 344.00	GLA
302	491 923.01	8 687 156.59	GLA
303	492 767.03	8 685 936.06	GLA
304	493 770.86	8 684 959.49	GLA
305	492 981.34	8 685 357.42	GLA
306	493 360.23	8 685 090.72	GLA
307	492 945.23	8 685 810.26	GLA
308	492 480.00	8 686 157.00	GLA
309	491 941.00	8 686 599.00	GLA
310	492 559.00	8 685 917.00	GLA
311	493 542.00	8 685 143.00	GLA
312	491 262.39	8 684 358.99	BOF
313	490 574.48	8 684 819.36	BOF
314	489 120.00	8 683 393.00	BOF
315	490 015.00	8 682 678.00	BOF
316	485 145.00	8 680 811.00	BOF
317	486 174.00	8 679 460.00	BOF
318	480 048.00	8 680 820.00	BOF
319	480 393.00	8 680 468.00	BOF
320	479 055.00	8 677 887.00	BOF
321	491 282.00	8 683 819.00	BOF
322	491 566.00	8 684 193.00	BOF
323	489 228.35	8 683 427.59	BOF
324	489 568.00	8 682 657.00	BOF
325	489 168.00	8 681 009.00	BOF
326	489 327.00	8 681 245.00	BOF
327	489 283.00	8 681 017.00	BOF
328	489 583.00	8 680 106.00	BOF
329	487 138.00	8 680 706.00	BOF
330	483 348.00	8 680 769.00	BOF
331	487 890.00	8 680 392.00	BOF
332	491 955.00	8 684 639.00	BOF
333	487 481.00	8 680 290.00	BOF
334	489 217.00	8 681 340.00	BOF
335	484 665.00	8 681 547.00	BOF
336	485 263.00	8 681 993.00	BOF
337	486 679.00	8 679 624.00	BOF
338	486 135.00	8 679 956.00	BOF
339	486 255.00	8 679 567.00	BOF
340	483 583.00	8 680 751.00	BOF
341	483 290.00	8 680 679.00	BOF
342	479 625.00	8 677 737.00	BOF
343	479 513.00	8 677 799.00	BOF
344	480 915.00	8 677 508.00	BOF
345	482 623.00	8 680 127.00	BOF
346	482 417.00	8 679 901.00	BOF
347	482 539.00	8 680 016.00	BOF
348	486 691.00	8 679 971.00	BOF
349	486 798.98	8 679 716.53	BOF
350	489 235.00	8 683 356.00	BOF
351	489 208.00	8 683 284.00	BOF
352	492 330.00	8 684 869.00	AGU
353	492 583.00	8 684 651.00	AGU
354	488 454.10	8 678 859.55	AGU
355	488 183.59	8 678 282.12	AGU
356	488 128.00	8 678 198.00	AGU
357	487 721.00	8 678 089.00	AGU
358	487 721.00	8 678 010.00	AGU
359	490 109.00	8 677 501.00	AGU
360	490 116.00	8 677 441.00	AGU
361	486 531.00	8 678 398.00	AGU
362	486 539.00	8 678 334.00	AGU
363	484 800.67	8 679 697.00	AGU
364	484 767.00	8 679 658.00	AGU
365	492 300.00	8 684 994.00	AGU
366	492 311.00	8 684 931.00	AGU
367	492 328.00	8 684 808.00	AGU
368	492 341.00	8 684 753.00	AGU
369	474 102.28	8 666 490.53	AGU
370	474 080.00	8 666 582.00	AGU
371	473 615.00	8 668 039.00	AGU
372	473 129.00	8 669 648.00	AGU
373	473 124.00	8 669 579.00	AGU
374	485 405.00	8 679 246.00	AGU
375	485 444.00	8 679 226.00	AGU
376	473 670.13	8 667 974.35	AGU

Nota: (AUR) Áreas urbanizadas, (CULT) Áreas agrícolas heterogéneas, (BOS) Bosque, (HERA) Herbazal abierto, (HERD) herbazal denso, (AR-TD) Afloramientos rocosos y tierras desnudas, (GLA) Glaciares, (BOF) Turberas y bofedales, (AGU) Cuerpos de agua.

Tabla 2. Puntos de validación para el año 2013

Orden	Coordenadas UTM (WGS 84, Zona 18 S)		Código
	Este (m)	Norte (m)	
1	474 534.00	8 667 046.00	AUR
2	474 394.00	8 667 537.00	AUR
3	474 629.00	8 668 384.00	AUR
4	476 619.00	8 674 750.00	AUR
5	476 065.37	8 667 308.73	AUR
6	475 072.00	8 667 694.00	AUR
7	476 366.00	8 668 551.00	AUR
8	475 414.00	8 669 490.00	AUR
9	476 668.62	8 667 964.90	AUR
10	477 039.03	8 667 425.15	AUR
11	475 778.00	8 667 076.00	AUR
12	475 642.00	8 666 786.00	AUR
13	476 358.08	8 667 469.99	AUR
14	476 816.78	8 667 684.44	AUR
15	476 011.00	8 667 682.00	AUR
16	474 832.40	8 667 335.19	AUR
17	474 837.00	8 667 156.00	AUR
18	475 110.00	8 666 614.00	AUR
19	474 851.00	8 667 744.00	AUR
20	474 927.65	8 668 023.11	AUR
21	475 778.00	8 670 504.00	AUR
22	474 783.00	8 670 933.00	AUR
23	474 086.28	8 670 038.71	AUR
24	474 750.00	8 669 899.00	AUR
25	478 227.00	8 673 139.00	AUR
26	479 730.00	8 671 884.00	AUR
27	479 907.00	8 671 959.00	AUR
28	477 463.00	8 674 012.00	AUR
29	476 703.00	8 668 616.00	AUR
30	476 287.00	8 670 720.00	AUR
31	475 245.00	8 671 377.00	AUR
32	474 307.40	8 670 978.65	AUR
33	474 640.00	8 670 247.00	AUR
34	473 874.00	8 670 228.00	AUR
35	474 446.00	8 668 132.00	AUR
36	477 164.00	8 673 983.00	AUR
37	476 267.00	8 666 174.00	AUR
38	475 559.00	8 668 631.00	AUR
39	476 572.00	8 666 423.00	AUR
40	475 483.00	8 666 269.00	AUR
41	475 949.00	8 666 591.00	AUR
42	476 318.00	8 666 761.00	AUR
43	476 857.00	8 666 966.00	AUR
44	475 558.00	8 667 317.00	AUR
45	475 909.00	8 670 737.00	AUR
46	475 484.00	8 670 776.00	AUR
47	478 664.00	8 672 637.00	AUR
48	475 181.00	8 670 310.00	AUR
49	474 976.00	8 671 025.00	AUR
50	475 434.00	8 666 606.00	AUR
51	475 714.00	8 665 586.00	CULT
52	475 223.00	8 665 812.00	CULT
53	474 930.00	8 665 878.00	CULT
54	474 865.00	8 666 062.00	CULT
55	474 140.00	8 668 491.00	CULT
56	479 854.00	8 673 456.00	CULT
57	479 629.00	8 673 253.00	CULT
58	478 882.00	8 673 550.00	CULT
59	479 040.00	8 673 887.00	CULT
60	478 278.00	8 670 470.00	CULT
61	477 923.00	8 670 498.00	CULT
62	481 178.00	8 673 079.00	CULT
63	481 174.00	8 672 989.00	CULT
64	479 985.00	8 672 965.00	CULT
65	480 091.00	8 672 755.00	CULT
66	480 278.00	8 672 899.00	CULT
67	480 333.00	8 672 753.00	CULT
68	479 220.00	8 671 781.86	CULT
69	477 684.00	8 672 280.00	CULT
70	477 741.00	8 672 144.00	CULT
71	479 397.00	8 672 164.00	CULT
72	477 424.00	8 673 731.00	CULT
73	477 226.00	8 673 775.00	CULT
74	476 996.00	8 673 704.00	CULT
75	476 821.00	8 674 137.00	CULT
76	476 449.00	8 674 219.00	CULT
77	476 588.00	8 673 780.00	CULT
78	475 763.00	8 673 133.00	CULT
79	476 212.00	8 672 234.00	CULT
80	476 033.00	8 672 010.00	CULT
81	476 668.00	8 674 154.00	CULT
82	476 223.00	8 671 906.00	CULT
83	477 019.00	8 671 129.00	CULT
84	474 663.00	8 671 588.00	CULT
85	477 568.00	8 670 637.00	CULT
86	474 215.00	8 668 273.00	CULT
87	479 039.00	8 674 255.00	CULT
88	479 571.00	8 673 827.00	CULT
89	479 073.00	8 673 994.00	CULT
90	477 236.00	8 669 036.00	CULT
91	478 675.00	8 671 906.00	CULT
92	477 086.00	8 672 297.00	CULT
93	477 600.00	8 672 091.00	CULT
94	477 392.00	8 672 237.00	CULT
95	478 308.00	8 672 442.00	CULT
96	477 962.00	8 673 097.00	CULT
97	476 278.00	8 673 721.00	CULT
98	475 976.00	8 671 491.00	CULT
99	476 271.00	8 673 200.00	CULT
100	476 804.00	8 670 514.00	CULT
101	477 133.00	8 675 739.00	BOS
102	478 218.00	8 675 053.00	BOS

103	478 034.00	8 674 852.00	BOS
104	478 038.00	8 674 714.00	BOS
105	490 002.00	8 675 832.00	BOS
106	487 332.00	8 674 106.00	BOS
107	473 693.00	8 668 994.00	BOS
108	487 048.00	8 673 841.00	BOS
109	486 962.00	8 673 311.00	BOS
110	485 800.00	8 672 427.00	BOS
111	485 023.00	8 672 667.00	BOS
112	484 427.00	8 672 881.00	BOS
113	482 693.00	8 673 034.00	BOS
114	483 177.00	8 672 997.00	BOS
115	482 132.00	8 672 913.00	BOS
116	480 758.60	8 674 143.52	BOS
117	480 583.00	8 674 029.00	BOS
118	480 322.00	8 673 735.00	BOS
119	480 035.00	8 673 704.00	BOS
120	479 634.00	8 674 717.00	BOS
121	478 484.00	8 673 786.00	BOS
122	480 091.46	8 673 569.13	BOS
123	480 106.00	8 673 392.00	BOS
124	480 674.00	8 672 869.00	BOS
125	480 427.00	8 672 867.00	BOS
126	478 620.00	8 673 296.00	BOS
127	479 355.00	8 672 978.00	BOS
128	473 588.00	8 669 540.00	BOS
129	474 402.00	8 671 724.00	BOS
130	477 299.00	8 674 735.00	BOS
131	477 826.00	8 675 996.00	BOS
132	478 326.00	8 673 367.00	BOS
133	479 863.00	8 674 242.00	BOS
134	480 350.00	8 673 648.00	BOS
135	482 099.00	8 673 070.00	BOS
136	481 786.00	8 672 989.00	BOS
137	478 219.00	8 668 845.00	BOS
138	478 302.00	8 673 890.00	BOS
139	478 409.00	8 674 255.00	BOS
140	481 231.00	8 672 454.00	BOS
141	480 579.00	8 672 624.00	BOS
142	478 038.00	8 671 483.00	BOS
143	476 315.00	8 669 553.00	BOS
144	476 383.83	8 669 434.36	BOS
145	473 713.00	8 669 671.00	BOS
146	473 655.00	8 669 465.00	BOS
147	473 523.00	8 669 773.00	BOS
148	473 819.00	8 669 351.00	BOS
149	474 123.00	8 669 417.00	BOS
150	474 612.00	8 671 794.00	BOS
151	478 771.00	8 681 470.00	HERA
152	478 476.00	8 674 794.00	HERA
153	479 746.00	8 676 971.00	HERA
154	479 232.00	8 676 535.00	HERA
155	481 433.13	8 676 731.69	HERA
156	480 801.76	8 676 221.39	HERA
157	480 570.00	8 677 390.00	HERA
158	479 420.00	8 676 721.00	HERA
159	482 929.00	8 676 956.00	HERA
160	489 387.00	8 675 423.00	HERA
161	485 902.00	8 673 779.00	HERA
162	480 460.00	8 673 811.00	HERA
163	480 604.00	8 673 689.00	HERA
164	480 462.00	8 673 519.00	HERA
165	483 051.00	8 677 537.00	HERA
166	484 252.00	8 675 055.00	HERA
167	480 571.00	8 674 725.00	HERA
168	479 392.00	8 674 742.00	HERA
169	479 177.00	8 674 913.00	HERA
170	479 278.00	8 675 001.00	HERA
171	480 845.67	8 675 163.72	HERA
172	477 642.00	8 671 256.00	HERA
173	486 637.00	8 678 147.00	HERA
174	483 260.00	8 679 590.00	HERA
175	489 528.00	8 680 593.00	HERA
176	480 296.00	8 681 883.00	HERA
177	481 409.00	8 673 331.00	HERA
178	480 963.90	8 673 134.95	HERA
179	478 930.00	8 672 077.00	HERA
180	478 961.00	8 671 855.00	HERA
181	476 171.00	8 674 000.00	HERA
182	482 290.00	8 681 804.00	HERA
183	479 555.00	8 676 160.00	HERA
184	483 036.00	8 675 967.00	HERA
185	487 773.76	8 674 274.13	HERA
186	486 632.00	8 673 986.00	HERA
187	480 615.19	8 673 764.58	HERA
188	489 249.00	8 677 521.00	HERA
189	484 804.00	8 677 250.00	HERA
190	478 702.00	8 671 791.00	HERA
191	478 392.00	8 671 712.00	HERA
192	476 719.00	8 672 556.00	HERA
193	476 640.94	8 672 497.07	HERA
194	477 597.00	8 671 608.00	HERA
195	479 036.00	8 679 149.00	HERA
196	481 402.00	8 675 662.00	HERA
197	480 784.00	8 678 612.00	HERA
198	489 113.00	8 676 017.00	HERA
199	481 634.00	8 680 097.00	HERA
200	488 532.00	8 676 321.00	HERA
201	488 023.00	8 678 693.00	HERA
202	484 160.00	8 676 064.00	HERA
203	485 050.00	8 677 034.00	HERA
204	483 772.00	8 680 504.00	HERA
205	485 811.00	8 675 790.00	HERD
206	484 080.00	8 680 965.00	HERD
207	484 574.00	8 682 224.00	HERD
208	483 950.00	8 682 477.00	HERD
209	485 089.00	8 675 250.00	HERD
210	483 279.00	8 682 152.00	HERD
211	483 301.00	8 681 809.00	HERD
212	484 561.00	8 681 548.00	HERD
213	478 274.71	8 681 407.44	HERD
214	485 094.00	8 682 478.00	HERD
215	483 859.00	8 681 463.00	HERD
216	483 929.00	8 679 581.00	HERD
217	484 495.00	8 679 043.00	HERD
218	484 290.00	8 678 722.00	HERD
219	481 969.00	8 677 856.00	HERD
220	483 982.00	8 678 603.00	HERD
221	484 448.00	8 678 546.00	HERD
222	482 855.00	8 678 565.00	HERD
223	483 816.00	8 678 445.00	HERD
224	484 333.00	8 678 297.00	HERD
225	481 584.00	8 677 511.00	HERD
226	478 066.00	8 680 013.00	HERD
227	480 493.00	8 679 314.00	HERD
228	481 497.10	8 681 829.84	HERD
229	483 744.00	8 682 669.00	HERD
230	484 610.00	8 682 473.00	HERD
231	485 375.00	8 682 277.00	HERD
232	484 642.00	8 681 310.00	HERD
233	488 443.00	8 677 479.00	HERD
234	485 192.00	8 682 158.00	HERD
235	488 335.00	8 677 318.00	HERD
236	486 755.00	8 680 829.00	HERD
237	486 054.00	8 680 214.00	HERD
238	483 546.00	8 681 978.00	HERD
239	483 664.00	8 682 267.00	HERD
240	484 036.00	8 682 690.00	HERD
241	481 995.00	8 676 911.00	HERD
242	485 463.00	8 677 579.00	HERD
243	485 139.00	8 681 294.00	HERD
244	479 098.10	8 680 520.97	HERD
245	487 579.00	8 675 252.00	HERD
246	486 216.00	8 674 913.00	HERD
247	480 773.00	8 679 397.00	HERD
248	479 599.00	8 679 586.00	HERD
249	479 587.00	8 680 780.00	HERD
250	482 192.00	8 681 180.00	HERD
251	483 087.00	8 681 024.00	HERD
252	479 288.00	8 675 869.00	AR-TD
253	491 403.73	8 686 307.88	AR-TD
254	491 591.00	8 686 210.00	AR-TD
255	492 254.64	8 685 368.08	AR-TD
256	492 191.14	8 685 158.53	AR-TD
257	488 685.93	8 680 072.17	AR-TD
258	487 568.33	8 680 662.72	AR-TD
259	485 885.57	8 681 259.62	AR-TD
260	486 063.37	8 681 342.17	AR-TD
261	486 215.00	8 681 262.00	AR-TD
262	490 177.48	8 677 800.63	AR-TD
263	490 484.39	8 677 419.63	AR-TD
264	491 404.44	8 685 875.37	AR-TD
265	487 012.00	8 681 716.00	AR-TD
266	488 409.79	8 680 843.90	AR-TD
267	488 134.00	8 680 915.00	AR-TD
268	487 547.00	8 681 324.00	AR-TD
269	493 304.70	8 684 533.36	AR-TD
270	491 727.14	8 685 723.35	AR-TD
271	491 268.00	8 686 517.00	AR-TD
272	491 267.82	8 685 278.59	AR-TD
273	490 881.53	8 686 352.80	AR-TD
274	490 099.36	8 684 278.35	AR-TD
275	490 305.00	8 685 157.00	AR-TD
276	490 289.86	8 684 773.12	AR-TD
277	491 810.00	8 684 020.00	AR-TD
278	488 651.00	8 683 030.00	AR-TD
279	488 799.00	8 682 854.00	AR-TD
280	490 076.00	8 678 230.00	AR-TD
281	489 805.00	8 679 193.00	AR-TD
282	491 783.84	8 686 838.74	GLA
283	491 961.64	8 686 749.84	GLA
284	492 291.84	8 686 210.09	GLA
285	492 926.84	8 685 619.53	GLA
286	492 901.44	8 685 454.43	GLA
287	493 416.00	8 684 953.00	GLA
288	493 422.14	8 685 340.13	GLA
289	493 786.00	8 684 805.00	GLA
290	493 859.00	8 684 608.00	GLA
291	493 894.58	8 684 383.82	GLA
292	493 631.00	8 684 472.00	GLA
293	493 799.00	8 684 307.00	GLA
294	493 982.00	8 684 203.00	GLA
295	493 546.00	8 684 689.00	GLA
296	493 973.00	8 684 296.00	GLA
297	493 149.00	8 685 546.00	GLA
298	493 095.00	8 685 756.00	GLA
299	492 945.23	8 685 810.26	GLA
300	492 480.00	8 686 157.00	GLA
301	491 721.42	8 686 695.02	GLA
302	492 811.00	8 685 344.00	GLA
303	491 923.01	8 687 156.59	GLA
304	493 289.00	8 685 229.00	GLA
305	492 767.03	8 685 936.06	GLA
306	493 770.86	8 684 959.49	GLA
307	492 981.34	8 685 357.42	GLA
308	493 360.23	8 685 090.72	GLA
309	491 941.00	8 686 599.00	GLA
310	492 559.00	8 685 917.00	GLA
311	493 542.00	8 685 143.00	GLA
312	491 262.39	8 684 358.99	BOF
313	490 574.48	8 684 819.36	BOF
314	489 120.00	8 683 393.00	BOF
315	490 015.00	8 682 678.00	BOF
316	485 145.00	8 680 811.00	BOF
317	486 174.00	8 679 460.00	BOF
318	480 048.00	8 680 820.00	BOF
319	480 393.00	8 680 468.00	BOF
320	479 055.00	8 677 887.00	BOF
321	479 513.00	8 677 799.00	BOF
322	491 282.00	8 683 819.00	BOF
323	491 566.00	8 684 193.00	BOF
324	489 228.35	8 683 427.59	BOF
325	489 568.00	8 682 657.00	BOF
326	489 168.00	8 681 009.00	BOF
327	489 327.00	8 681 245.00	BOF
328	489 283.00	8 681 017.00	BOF
329	489 583.00	8 680 106.00	BOF
330	487 138.00	8 680 706.00	BOF
331	483 348.00	8 680 769.00	BOF
332	484 665.00	8 681 547.00	BOF
333	491 955.00	8 684 639.00	BOF
334	487 481.00	8 680 290.00	BOF
335	489 217.00	8 681 340.00	BOF
336	487 890.00	8 680 392.00	BOF
337	485 263.00	8 681 993.00	BOF
338	486 679.00	8 679 624.00	BOF
339	486 135.00	8 679 956.00	BOF
340	486 255.00	8 679 567.00	BOF
341	483 583.00	8 680 751.00	BOF
342	483 290.00	8 680 679.00	BOF
343	479 625.00	8 677 737.00	BOF
344	480 915.00	8 677 508.00	BOF
345	482 623.00	8 680 127.00	BOF
346	482 417.00	8 679 901.00	BOF
347	482 539.00	8 680 016.00	BOF
348	486 691.00	8 679 971.00	BOF
349	486 798.98	8 679 716.53	BOF
350	489 235.00	8 683 356.00	BOF
351	489 208.00	8 683 284.00	BOF
352	492 330.00	8 684 869.00	AGU
353	492 583.00	8 684 651.00	AGU
354	488 454.10	8 678 859.55	AGU
355	488 183.59	8 678 282.12	AGU
356	488 128.00	8 678 198.00	AGU
357	487 721.00	8 678 089.00	AGU
358	487 721.00	8 678 010.00	AGU
359	490 109.00	8 677 501.00	AGU
360	490 116.00	8 677 441.00	AGU
361	486 531.00	8 678 398.00	AGU
362	486 539.00	8 678 334.00	AGU
363	484 800.67	8 679 697.00	AGU

364	484 767.00	8 679 658.00	AGU
365	492 300.00	8 684 994.00	AGU
366	492 311.00	8 684 931.00	AGU
367	492 328.00	8 684 808.00	AGU
368	492 341.00	8 684 753.00	AGU
369	474 143.00	8 666 195.00	AGU
370	473 332.00	8 669 221.00	AGU
371	473 411.00	8 669 191.00	AGU
372	474 226.00	8 665 811.00	AGU
373	474 103.00	8 666 415.00	AGU
374	485 405.00	8 679 246.00	AGU
375	485 444.00	8 679 226.00	AGU
376	473 681.00	8 667 989.00	AGU

Nota: (AUR) Áreas urbanizadas, (CULT) Áreas agrícolas heterogéneas, (BOS) Bosque, (HERA) Herbazal abierto, (HERD) herbazal denso, (AR-TD) Afloramientos rocosos y tierras desnudas, (GLA) Glaciares, (BOF) Turberas y bofedales, (AGU) Cuerpos de agua.

Tabla 3. Puntos de validación para el año 2003

Orden	Coordenadas UTM (WGS 84, Zona 18 S)		Código
	Este (m)	Norte (m)	
1	474 534.00	8 667 046.00	AUR
2	474 394.00	8 667 537.00	AUR
3	474 629.00	8 668 384.00	AUR
4	476 619.00	8 674 750.00	AUR
5	476 065.37	8 667 308.73	AUR
6	475 072.00	8 667 694.00	AUR
7	476 366.00	8 668 551.00	AUR
8	475 414.00	8 669 490.00	AUR
9	476 668.62	8 667 964.90	AUR
10	477 039.03	8 667 425.15	AUR
11	475 778.00	8 667 076.00	AUR
12	475 642.00	8 666 786.00	AUR
13	476 358.08	8 667 469.99	AUR
14	476 816.78	8 667 684.44	AUR
15	476 011.00	8 667 682.00	AUR
16	474 832.40	8 667 335.19	AUR
17	474 837.00	8 667 156.00	AUR
18	475 110.00	8 666 614.00	AUR
19	474 851.00	8 667 744.00	AUR
20	474 927.65	8 668 023.11	AUR
21	475 778.00	8 670 504.00	AUR
22	474 783.00	8 670 933.00	AUR
23	474 086.28	8 670 038.71	AUR
24	474 750.00	8 669 899.00	AUR
25	478 227.00	8 673 139.00	AUR
26	479 730.00	8 671 884.00	AUR
27	479 907.00	8 671 959.00	AUR
28	477 463.00	8 674 012.00	AUR
29	476 703.00	8 668 616.00	AUR
30	476 287.00	8 670 720.00	AUR
31	475 245.00	8 671 377.00	AUR
32	477 396.00	8 667 066.00	AUR
33	474 640.00	8 670 247.00	AUR
34	473 874.00	8 670 228.00	AUR
35	474 446.00	8 668 132.00	AUR
36	477 164.00	8 673 983.00	AUR
37	476 267.00	8 666 174.00	AUR
38	475 559.00	8 668 631.00	AUR
39	476 572.00	8 666 423.00	AUR
40	475 483.00	8 666 269.00	AUR
41	475 949.00	8 666 591.00	AUR
42	476 318.00	8 666 761.00	AUR
43	476 857.00	8 666 966.00	AUR
44	475 558.00	8 667 317.00	AUR
45	475 909.00	8 670 737.00	AUR
46	475 484.00	8 670 776.00	AUR
47	478 664.00	8 672 637.00	AUR
48	475 181.00	8 670 310.00	AUR
49	477 526.00	8 667 945.00	AUR
50	475 434.00	8 666 606.00	AUR
51	474 930.00	8 665 878.00	CULT
52	474 865.00	8 666 062.00	CULT
53	474 140.00	8 668 491.00	CULT
54	480 460.00	8 673 811.00	CULT
55	480 604.00	8 673 689.00	CULT
56	480 462.00	8 673 519.00	CULT
57	479 854.00	8 673 456.00	CULT
58	479 629.00	8 673 253.00	CULT
59	478 882.00	8 673 550.00	CULT
60	479 392.00	8 674 742.00	CULT
61	478 966.00	8 674 761.00	CULT
62	479 040.00	8 673 887.00	CULT
63	478 278.00	8 670 470.00	CULT
64	477 923.00	8 670 498.00	CULT
65	479 985.00	8 672 965.00	CULT
66	480 091.00	8 672 755.00	CULT
67	480 278.00	8 672 899.00	CULT
68	480 333.00	8 672 753.00	CULT
69	478 930.00	8 672 077.00	CULT
70	479 220.00	8 671 781.86	CULT
71	477 741.00	8 672 144.00	CULT
72	477 424.00	8 673 731.00	CULT
73	476 449.00	8 674 219.00	CULT
74	476 588.00	8 673 780.00	CULT
75	475 763.00	8 673 133.00	CULT
76	476 212.00	8 672 234.00	CULT
77	476 033.00	8 672 010.00	CULT
78	476 668.00	8 674 154.00	CULT
79	476 223.00	8 671 906.00	CULT
80	477 019.00	8 671 129.00	CULT
81	474 663.00	8 671 588.00	CULT
82	477 568.00	8 670 637.00	CULT
83	474 215.00	8 668 273.00	CULT
84	480 615.19	8 673 764.58	CULT
85	479 039.00	8 674 255.00	CULT
86	479 571.00	8 673 827.00	CULT
87	479 073.00	8 673 994.00	CULT
88	477 236.00	8 669 036.00	CULT
89	478 675.00	8 671 906.00	CULT
90	477 086.00	8 672 297.00	CULT
91	477 600.00	8 672 091.00	CULT
92	477 392.00	8 672 237.00	CULT
93	478 308.00	8 672 442.00	CULT
94	477 962.00	8 673 097.00	CULT
95	476 278.00	8 673 721.00	CULT
96	475 976.00	8 671 491.00	CULT
97	476 271.00	8 673 200.00	CULT
98	476 804.00	8 670 514.00	CULT
99	476 821.00	8 674 137.00	CULT
100	476 996.00	8 673 704.00	CULT
101	477 133.00	8 675 739.00	BOS
102	477 051.00	8 676 504.00	BOS
103	478 034.00	8 674 852.00	BOS
104	478 038.00	8 674 714.00	BOS
105	485 800.00	8 672 427.00	BOS
106	485 023.00	8 672 667.00	BOS
107	482 693.00	8 673 034.00	BOS
108	483 177.00	8 672 997.00	BOS
109	482 132.00	8 672 913.00	BOS
110	480 322.00	8 673 735.00	BOS
111	480 035.00	8 673 704.00	BOS
112	480 091.46	8 673 569.13	BOS
113	480 106.00	8 673 392.00	BOS
114	480 674.00	8 672 869.00	BOS
115	480 427.00	8 672 867.00	BOS
116	478 620.00	8 673 296.00	BOS
117	479 355.00	8 672 978.00	BOS
118	473 588.00	8 669 540.00	BOS
119	474 402.00	8 671 724.00	BOS
120	477 299.00	8 674 735.00	BOS
121	477 826.00	8 675 996.00	BOS
122	478 326.00	8 673 367.00	BOS
123	480 363.00	8 673 911.00	BOS
124	482 099.00	8 673 070.00	BOS
125	481 786.00	8 672 989.00	BOS
126	478 219.00	8 668 845.00	BOS
127	478 302.00	8 673 890.00	BOS
128	478 409.00	8 674 255.00	BOS
129	481 231.00	8 672 454.00	BOS
130	480 579.00	8 672 624.00	BOS
131	476 315.00	8 669 553.00	BOS
132	476 383.83	8 669 434.36	BOS
133	473 713.00	8 669 671.00	BOS
134	473 655.00	8 669 465.00	BOS
135	473 523.00	8 669 773.00	BOS
136	473 819.00	8 669 351.00	BOS
137	477 470.00	8 674 948.00	BOS
138	478 218.00	8 675 053.00	BOS
139	480 350.00	8 673 648.00	BOS
140	477 004.00	8 674 377.00	BOS
141	478 389.00	8 673 437.00	BOS
142	478 484.00	8 673 786.00	BOS
143	478 083.00	8 674 629.00	BOS
144	484 427.00	8 672 881.00	BOS
145	474 612.00	8 671 794.00	BOS
146	473 591.00	8 669 080.00	BOS
147	473 693.00	8 668 994.00	BOS
148	473 597.00	8 669 229.00	BOS
149	474 123.00	8 669 417.00	BOS
150	487 048.00	8 673 841.00	BOS
151	478 476.00	8 674 794.00	HERA
152	479 746.00	8 676 971.00	HERA
153	479 232.00	8 676 535.00	HERA
154	480 801.76	8 676 221.39	HERA
155	480 570.00	8 677 390.00	HERA
156	479 420.00	8 676 721.00	HERA
157	482 929.00	8 676 956.00	HERA
158	489 387.00	8 675 423.00	HERA
159	485 902.00	8 673 779.00	HERA
160	480 758.60	8 674 143.52	HERA
161	480 583.00	8 674 029.00	HERA
162	483 051.00	8 677 537.00	HERA
163	484 252.00	8 675 055.00	HERA
164	479 634.00	8 674 717.00	HERA
165	480 571.00	8 674 725.00	HERA
166	479 177.00	8 674 913.00	HERA
167	479 278.00	8 675 001.00	HERA
168	483 036.00	8 675 967.00	HERA
169	477 642.00	8 671 256.00	HERA
170	486 637.00	8 678 147.00	HERA
171	483 260.00	8 679 590.00	HERA
172	489 528.00	8 680 593.00	HERA
173	480 296.00	8 681 883.00	HERA
174	481 409.00	8 673 331.00	HERA
175	480 963.90	8 673 134.95	HERA
176	481 174.00	8 672 989.00	HERA
177	478 961.00	8 671 855.00	HERA
178	478 771.00	8 681 470.00	HERA
179	476 171.00	8 674 000.00	HERA
180	482 290.00	8 681 804.00	HERA
181	479 863.00	8 674 242.00	HERA
182	490 002.00	8 675 832.00	HERA
183	479 555.00	8 676 160.00	HERA
184	480 845.67	8 675 163.72	HERA
185	487 773.76	8 674 274.13	HERA
186	486 632.00	8 673 986.00	HERA
187	489 249.00	8 677 521.00	HERA
188	484 804.00	8 677 250.00	HERA
189	478 702.00	8 671 791.00	HERA
190	478 392.00	8 671 712.00	HERA
191	476 719.00	8 672 556.00	HERA
192	476 640.94	8 672 497.07	HERA
193	477 597.00	8 671 608.00	HERA
194	479 036.00	8 679 149.00	HERA
195	480 784.00	8 678 612.00	HERA
196	481 634.00	8 680 097.00	HERA
197	481 402.00	8 675 662.00	HERA
198	484 160.00	8 676 064.00	HERA
199	485 050.00	8 677 034.00	HERA
200	489 113.00	8 676 017.00	HERA
201	488 532.00	8 676 321.00	HERA
202	488 023.00	8 678 693.00	HERA
203	483 772.00	8 680 504.00	HERA
204	481 433.13	8 676 731.69	HERA
205	478 066.00	8 680 013.00	HERD
206	485 811.00	8 675 790.00	HERD
207	484 080.00	8 680 965.00	HERD
208	484 574.00	8 682 224.00	HERD
209	483 950.00	8 682 477.00	HERD
210	485 089.00	8 675 250.00	HERD

211	483 279.00	8 682 152.00	HERD
212	483 301.00	8 681 809.00	HERD
213	484 561.00	8 681 548.00	HERD
214	478 274.71	8 681 407.44	HERD
215	485 094.00	8 682 478.00	HERD
216	483 859.00	8 681 463.00	HERD
217	483 929.00	8 679 581.00	HERD
218	484 495.00	8 679 043.00	HERD
219	484 290.00	8 678 722.00	HERD
220	481 969.00	8 677 856.00	HERD
221	483 982.00	8 678 603.00	HERD
222	484 448.00	8 678 546.00	HERD
223	482 855.00	8 678 565.00	HERD
224	483 816.00	8 678 445.00	HERD
225	484 333.00	8 678 297.00	HERD
226	481 584.00	8 677 511.00	HERD
227	480 773.00	8 679 397.00	HERD
228	481 497.10	8 681 829.84	HERD
229	483 744.00	8 682 669.00	HERD
230	484 610.00	8 682 473.00	HERD
231	485 375.00	8 682 277.00	HERD
232	484 642.00	8 681 310.00	HERD
233	488 443.00	8 677 479.00	HERD
234	485 192.00	8 682 158.00	HERD
235	488 335.00	8 677 318.00	HERD
236	486 755.00	8 680 829.00	HERD
237	486 054.00	8 680 214.00	HERD
238	483 546.00	8 681 978.00	HERD
239	483 664.00	8 682 267.00	HERD
240	484 036.00	8 682 690.00	HERD
241	481 995.00	8 676 911.00	HERD
242	485 463.00	8 677 579.00	HERD
243	483 087.00	8 681 024.00	HERD
244	479 599.00	8 679 586.00	HERD
245	479 098.10	8 680 520.97	HERD
246	485 139.00	8 681 294.00	HERD
247	486 216.00	8 674 913.00	HERD
248	487 579.00	8 675 252.00	HERD
249	482 192.00	8 681 180.00	HERD
250	479 587.00	8 680 780.00	HERD
251	480 493.00	8 679 314.00	HERD
252	479 288.00	8 675 869.00	AR-TD
253	491 403.73	8 686 307.88	AR-TD
254	491 591.00	8 686 210.00	AR-TD
255	492 254.64	8 685 368.08	AR-TD
256	492 191.14	8 685 158.53	AR-TD
257	488 685.93	8 680 072.17	AR-TD
258	487 568.33	8 680 662.72	AR-TD
259	485 885.57	8 681 259.62	AR-TD
260	486 063.37	8 681 342.17	AR-TD
261	486 215.00	8 681 262.00	AR-TD
262	490 177.48	8 677 800.63	AR-TD
263	490 484.39	8 677 419.63	AR-TD
264	491 404.44	8 685 875.37	AR-TD
265	487 012.00	8 681 716.00	AR-TD
266	488 409.79	8 680 843.90	AR-TD
267	488 134.00	8 680 915.00	AR-TD
268	487 547.00	8 681 324.00	AR-TD
269	493 304.70	8 684 533.36	AR-TD
270	491 727.14	8 685 723.35	AR-TD
271	491 268.00	8 686 517.00	AR-TD
272	491 267.82	8 685 278.59	AR-TD
273	490 881.53	8 686 352.80	AR-TD
274	490 099.36	8 684 278.35	AR-TD
275	490 305.00	8 685 157.00	AR-TD
276	490 289.86	8 684 773.12	AR-TD
277	491 810.00	8 684 020.00	AR-TD
278	488 651.00	8 683 030.00	AR-TD
279	488 799.00	8 682 854.00	AR-TD
280	490 076.00	8 678 230.00	AR-TD
281	489 805.00	8 679 193.00	AR-TD
282	491 783.84	8 686 838.74	GLA
283	491 961.64	8 686 749.84	GLA
284	492 291.84	8 686 210.09	GLA
285	492 926.84	8 685 619.53	GLA
286	492 901.44	8 685 454.43	GLA
287	493 416.00	8 684 953.00	GLA
288	493 422.14	8 685 340.13	GLA
289	493 786.00	8 684 805.00	GLA
290	493 859.00	8 684 608.00	GLA
291	493 894.58	8 684 383.82	GLA
292	493 631.00	8 684 472.00	GLA
293	493 799.00	8 684 307.00	GLA
294	493 982.00	8 684 203.00	GLA
295	493 546.00	8 684 689.00	GLA
296	493 973.00	8 684 296.00	GLA
297	493 149.00	8 685 546.00	GLA
298	493 095.00	8 685 756.00	GLA
299	492 945.23	8 685 810.26	GLA
300	492 480.00	8 686 157.00	GLA
301	491 721.42	8 686 695.02	GLA
302	492 811.00	8 685 344.00	GLA
303	491 923.01	8 687 156.59	GLA
304	493 289.00	8 685 229.00	GLA
305	492 767.03	8 685 936.06	GLA
306	493 770.86	8 684 959.49	GLA
307	492 981.34	8 685 357.42	GLA
308	493 360.23	8 685 090.72	GLA
309	491 941.00	8 686 599.00	GLA
310	492 559.00	8 685 917.00	GLA
311	493 542.00	8 685 143.00	GLA
312	491 262.39	8 684 358.99	BOF
313	490 574.48	8 684 819.36	BOF
314	489 120.00	8 683 393.00	BOF
315	490 015.00	8 682 678.00	BOF
316	485 145.00	8 680 811.00	BOF
317	486 174.00	8 679 460.00	BOF
318	480 048.00	8 680 820.00	BOF
319	480 393.00	8 680 468.00	BOF
320	484 665.00	8 681 547.00	BOF
321	489 217.00	8 681 340.00	BOF
322	491 282.00	8 683 819.00	BOF
323	491 566.00	8 684 193.00	BOF
324	489 228.35	8 683 427.59	BOF
325	489 568.00	8 682 657.00	BOF
326	489 168.00	8 681 009.00	BOF
327	489 327.00	8 681 245.00	BOF
328	489 283.00	8 681 017.00	BOF
329	489 583.00	8 680 106.00	BOF
330	487 138.00	8 680 706.00	BOF
331	483 348.00	8 680 769.00	BOF
332	479 055.00	8 677 887.00	BOF
333	491 955.00	8 684 639.00	BOF
334	487 481.00	8 680 290.00	BOF
335	487 890.00	8 680 392.00	BOF
336	485 263.00	8 681 993.00	BOF
337	486 679.00	8 679 624.00	BOF
338	486 135.00	8 679 956.00	BOF
339	486 255.00	8 679 567.00	BOF
340	483 583.00	8 680 751.00	BOF
341	483 290.00	8 680 679.00	BOF
342	479 625.00	8 677 737.00	BOF
343	480 915.00	8 677 508.00	BOF
344	479 513.00	8 677 799.00	BOF
345	482 623.00	8 680 127.00	BOF
346	482 417.00	8 679 901.00	BOF
347	482 539.00	8 680 016.00	BOF
348	486 691.00	8 679 971.00	BOF
349	486 798.98	8 679 716.53	BOF
350	489 235.00	8 683 356.00	BOF
351	489 208.00	8 683 284.00	BOF
352	492 330.00	8 684 869.00	AGU
353	492 583.00	8 684 651.00	AGU
354	488 454.10	8 678 859.55	AGU
355	488 183.59	8 678 282.12	AGU
356	488 128.00	8 678 198.00	AGU
357	487 721.00	8 678 089.00	AGU
358	487 721.00	8 678 010.00	AGU
359	490 109.00	8 677 501.00	AGU
360	490 116.00	8 677 441.00	AGU
361	486 531.00	8 678 398.00	AGU
362	486 539.00	8 678 334.00	AGU
363	484 800.67	8 679 697.00	AGU
364	484 767.00	8 679 658.00	AGU
365	492 300.00	8 684 994.00	AGU
366	492 311.00	8 684 931.00	AGU
367	492 328.00	8 684 808.00	AGU
368	492 341.00	8 684 753.00	AGU
369	474 143.00	8 666 195.00	AGU
370	473 280.00	8 669 503.00	AGU
371	473 250.00	8 669 408.00	AGU
372	474 137.00	8 666 484.00	AGU
373	485 405.00	8 679 246.00	AGU
374	485 444.00	8 679 226.00	AGU
375	473 238.00	8 669 802.00	AGU
376	473 115.00	8 669 604.00	AGU

Nota: (AUR) Áreas urbanizadas, (CULT) Áreas agrícolas heterogéneas, (BOS) Bosque, (HERA) Herbazal abierto, (HERD) herbazal denso, (AR-TD) Afloramientos rocosos y tierras desnudas, (GLA) Glaciares, (BOF) Turberas y bofedales, (AGU) Cuerpos de agua.

Tabla 4. Puntos de validación para el año 1990

Orden	Coordenadas UTM (WGS 84, Zona 18 S)		Código
	Este (m)	Norte (m)	
1	474 534.00	8 667 046.00	AUR
2	474 394.00	8 667 537.00	AUR
3	474 629.00	8 668 384.00	AUR
4	476 619.00	8 674 750.00	AUR
5	476 065.37	8 667 308.73	AUR
6	475 072.00	8 667 694.00	AUR
7	476 366.00	8 668 551.00	AUR
8	475 414.00	8 669 490.00	AUR
9	476 668.62	8 667 964.90	AUR
10	477 039.03	8 667 425.15	AUR
11	475 778.00	8 667 076.00	AUR
12	475 642.00	8 666 786.00	AUR
13	476 358.08	8 667 469.99	AUR
14	476 816.78	8 667 684.44	AUR
15	476 011.00	8 667 682.00	AUR
16	474 832.40	8 667 335.19	AUR
17	474 837.00	8 667 156.00	AUR
18	475 110.00	8 666 614.00	AUR
19	474 927.65	8 668 023.11	AUR
20	475 778.00	8 670 504.00	AUR
21	474 783.00	8 670 933.00	AUR
22	474 086.28	8 670 038.71	AUR
23	474 750.00	8 669 899.00	AUR
24	478 227.00	8 673 139.00	AUR
25	479 730.00	8 671 884.00	AUR
26	479 907.00	8 671 959.00	AUR
27	477 463.00	8 674 012.00	AUR
28	476 703.00	8 668 616.00	AUR
29	476 287.00	8 670 720.00	AUR
30	475 245.00	8 671 377.00	AUR
31	474 640.00	8 670 247.00	AUR
32	473 874.00	8 670 228.00	AUR
33	477 164.00	8 673 983.00	AUR
34	476 267.00	8 666 174.00	AUR
35	476 572.00	8 666 423.00	AUR
36	475 483.00	8 666 269.00	AUR
37	475 949.00	8 666 591.00	AUR
38	476 318.00	8 666 761.00	AUR
39	476 857.00	8 666 966.00	AUR
40	475 558.00	8 667 317.00	AUR
41	475 909.00	8 670 737.00	AUR
42	478 664.00	8 672 637.00	AUR
43	475 181.00	8 670 310.00	AUR
44	477 526.00	8 667 945.00	AUR
45	475 434.00	8 666 606.00	AUR
46	476 557.00	8 668 218.00	AUR
47	475 559.00	8 668 631.00	AUR
48	476 038.00	8 665 837.00	AUR
49	477 396.00	8 667 066.00	AUR
50	475 096.00	8 666 395.00	AUR
51	474 930.00	8 665 878.00	CULT
52	474 865.00	8 666 062.00	CULT
53	474 140.00	8 668 491.00	CULT
54	478 476.00	8 674 794.00	CULT
55	480 604.00	8 673 689.00	CULT
56	480 462.00	8 673 519.00	CULT
57	480 322.00	8 673 735.00	CULT
58	480 035.00	8 673 704.00	CULT
59	479 629.00	8 673 253.00	CULT
60	478 882.00	8 673 550.00	CULT

61	479 392.00	8 674 742.00	CULT
62	478 966.00	8 674 761.00	CULT
63	479 040.00	8 673 887.00	CULT
64	478 278.00	8 670 470.00	CULT
65	480 091.46	8 673 569.13	CULT
66	479 985.00	8 672 965.00	CULT
67	480 091.00	8 672 755.00	CULT
68	480 278.00	8 672 899.00	CULT
69	480 333.00	8 672 753.00	CULT
70	478 961.00	8 671 855.00	CULT
71	477 741.00	8 672 144.00	CULT
72	477 424.00	8 673 731.00	CULT
73	476 449.00	8 674 219.00	CULT
74	476 588.00	8 673 780.00	CULT
75	475 763.00	8 673 133.00	CULT
76	476 033.00	8 672 010.00	CULT
77	476 668.00	8 674 154.00	CULT
78	477 019.00	8 671 129.00	CULT
79	474 663.00	8 671 588.00	CULT
80	477 568.00	8 670 637.00	CULT
81	474 851.00	8 667 744.00	CULT
82	474 077.00	8 670 980.00	CULT
83	479 039.00	8 674 255.00	CULT
84	479 571.00	8 673 827.00	CULT
85	479 073.00	8 673 994.00	CULT
86	477 236.00	8 669 036.00	CULT
87	478 675.00	8 671 906.00	CULT
88	477 086.00	8 672 297.00	CULT
89	477 600.00	8 672 091.00	CULT
90	477 392.00	8 672 237.00	CULT
91	478 308.00	8 672 442.00	CULT
92	477 962.00	8 673 097.00	CULT
93	476 278.00	8 673 721.00	CULT
94	476 271.00	8 673 200.00	CULT
95	474 446.00	8 668 132.00	CULT
96	475 484.00	8 670 776.00	CULT
97	476 804.00	8 670 514.00	CULT
98	476 821.00	8 674 137.00	CULT
99	475 976.00	8 671 491.00	CULT
100	479 220.00	8 671 781.86	CULT
101	477 133.00	8 675 739.00	BOS
102	477 051.00	8 676 504.00	BOS
103	478 034.00	8 674 852.00	BOS
104	478 038.00	8 674 714.00	BOS
105	485 023.00	8 672 667.00	BOS
106	484 427.00	8 672 881.00	BOS
107	482 693.00	8 673 034.00	BOS
108	483 177.00	8 672 997.00	BOS
109	482 132.00	8 672 913.00	BOS
110	473 588.00	8 669 540.00	BOS
111	474 402.00	8 671 724.00	BOS
112	477 299.00	8 674 735.00	BOS
113	477 826.00	8 675 996.00	BOS
114	478 326.00	8 673 367.00	BOS
115	482 099.00	8 673 070.00	BOS
116	481 786.00	8 672 989.00	BOS
117	478 219.00	8 668 845.00	BOS
118	478 302.00	8 673 890.00	BOS
119	478 409.00	8 674 255.00	BOS
120	476 315.00	8 669 553.00	BOS
121	476 383.83	8 669 434.36	BOS
122	473 713.00	8 669 671.00	BOS
123	473 655.00	8 669 465.00	BOS
124	473 523.00	8 669 773.00	BOS
125	473 819.00	8 669 351.00	BOS
126	477 470.00	8 674 948.00	BOS
127	478 218.00	8 675 053.00	BOS
128	477 004.00	8 674 377.00	BOS
129	478 389.00	8 673 437.00	BOS
130	478 484.00	8 673 786.00	BOS
131	478 083.00	8 674 629.00	BOS
132	474 612.00	8 671 794.00	BOS
133	473 591.00	8 669 080.00	BOS
134	473 693.00	8 668 994.00	BOS
135	473 597.00	8 669 229.00	BOS
136	473 594.00	8 669 355.00	BOS
137	481 231.00	8 672 454.00	BOS
138	479 355.00	8 672 978.00	BOS
139	478 620.00	8 673 296.00	BOS
140	479 114.00	8 673 338.00	BOS
141	477 883.00	8 676 116.00	BOS
142	478 201.00	8 668 685.00	BOS
143	473 737.13	8 668 806.52	BOS
144	473 921.28	8 668 863.67	BOS
145	474 092.73	8 668 946.22	BOS
146	474 264.18	8 669 016.07	BOS
147	474 353.08	8 669 149.42	BOS
148	474 575.33	8 669 225.62	BOS
149	480 350.00	8 673 648.00	BOS
150	474 123.00	8 669 417.00	BOS
151	479 746.00	8 676 971.00	HERA
152	479 232.00	8 676 535.00	HERA
153	481 433.13	8 676 731.69	HERA
154	480 801.76	8 676 221.39	HERA
155	480 570.00	8 677 390.00	HERA
156	479 420.00	8 676 721.00	HERA
157	482 929.00	8 676 956.00	HERA
158	490 002.00	8 675 832.00	HERA
159	489 387.00	8 675 423.00	HERA
160	485 902.00	8 673 779.00	HERA
161	485 800.00	8 672 427.00	HERA
162	480 758.60	8 674 143.52	HERA
163	480 583.00	8 674 029.00	HERA
164	480 460.00	8 673 811.00	HERA
165	483 051.00	8 677 537.00	HERA
166	484 252.00	8 675 055.00	HERA
167	479 634.00	8 674 717.00	HERA
168	480 571.00	8 674 725.00	HERA
169	479 177.00	8 674 913.00	HERA
170	479 278.00	8 675 001.00	HERA
171	483 036.00	8 675 967.00	HERA
172	486 637.00	8 678 147.00	HERA
173	483 260.00	8 679 590.00	HERA
174	489 528.00	8 680 593.00	HERA
175	480 296.00	8 681 883.00	HERA
176	481 409.00	8 673 331.00	HERA
177	480 963.90	8 673 134.95	HERA
178	481 174.00	8 672 989.00	HERA
179	480 674.00	8 672 869.00	HERA
180	478 771.00	8 681 470.00	HERA
181	476 171.00	8 674 000.00	HERA
182	482 290.00	8 681 804.00	HERA
183	479 863.00	8 674 242.00	HERA
184	477 642.00	8 671 256.00	HERA
185	479 555.00	8 676 160.00	HERA
186	480 845.67	8 675 163.72	HERA
187	487 773.76	8 674 274.13	HERA
188	486 632.00	8 673 986.00	HERA
189	489 249.00	8 677 521.00	HERA
190	484 804.00	8 677 250.00	HERA
191	478 702.00	8 671 791.00	HERA
192	478 392.00	8 671 712.00	HERA
193	476 719.00	8 672 556.00	HERA
194	476 640.94	8 672 497.07	HERA
195	477 597.00	8 671 608.00	HERA
196	484 160.00	8 676 064.00	HERA
197	481 402.00	8 675 662.00	HERA
198	485 050.00	8 677 034.00	HERA
199	489 113.00	8 676 017.00	HERA
200	488 023.00	8 678 693.00	HERA
201	483 772.00	8 680 504.00	HERA
202	481 634.00	8 680 097.00	HERA
203	480 784.00	8 678 612.00	HERA
204	488 532.00	8 676 321.00	HERA
205	485 811.00	8 675 790.00	HERD
206	484 080.00	8 680 965.00	HERD
207	484 574.00	8 682 224.00	HERD
208	483 950.00	8 682 477.00	HERD
209	485 089.00	8 675 250.00	HERD
210	483 279.00	8 682 152.00	HERD
211	483 301.00	8 681 809.00	HERD
212	484 561.00	8 681 548.00	HERD
213	478 274.71	8 681 407.44	HERD
214	485 094.00	8 682 478.00	HERD
215	483 859.00	8 681 463.00	HERD
216	483 929.00	8 679 581.00	HERD
217	484 495.00	8 679 043.00	HERD
218	484 290.00	8 678 722.00	HERD
219	481 969.00	8 677 856.00	HERD
220	483 982.00	8 678 603.00	HERD
221	484 448.00	8 678 546.00	HERD
222	482 855.00	8 678 565.00	HERD
223	483 816.00	8 678 445.00	HERD
224	484 333.00	8 678 297.00	HERD
225	481 584.00	8 677 511.00	HERD
226	480 773.00	8 679 397.00	HERD
227	481 497.10	8 681 829.84	HERD
228	483 744.00	8 682 669.00	HERD
229	484 610.00	8 682 473.00	HERD
230	485 375.00	8 682 277.00	HERD
231	484 642.00	8 681 310.00	HERD
232	488 443.00	8 677 479.00	HERD
233	485 192.00	8 682 158.00	HERD
234	488 335.00	8 677 318.00	HERD
235	486 755.00	8 680 829.00	HERD
236	486 054.00	8 680 214.00	HERD
237	483 546.00	8 681 978.00	HERD
238	483 664.00	8 682 267.00	HERD
239	484 036.00	8 682 690.00	HERD
240	481 995.00	8 676 911.00	HERD
241	478 066.00	8 680 013.00	HERD
242	485 463.00	8 677 579.00	HERD
243	479 587.00	8 680 780.00	HERD
244	479 098.10	8 680 520.97	HERD
245	479 599.00	8 679 586.00	HERD
246	480 493.00	8 679 314.00	HERD
247	487 579.00	8 675 252.00	HERD
248	486 216.00	8 674 913.00	HERD
249	483 087.00	8 681 024.00	HERD
250	485 139.00	8 681 294.00	HERD
251	482 192.00	8 681 180.00	HERD
252	479 288.00	8 675 869.00	AR-TD
253	491 403.73	8 686 307.88	AR-TD
254	491 591.00	8 686 210.00	AR-TD
255	492 254.64	8 685 368.08	AR-TD
256	492 191.14	8 685 158.53	AR-TD
257	488 685.93	8 680 072.17	AR-TD
258	487 568.33	8 680 662.72	AR-TD
259	485 885.57	8 681 259.62	AR-TD
260	486 063.37	8 681 342.17	AR-TD
261	486 215.00	8 681 262.00	AR-TD
262	490 177.48	8 677 800.63	AR-TD
263	490 484.39	8 677 419.63	AR-TD
264	491 404.44	8 685 875.37	AR-TD
265	487 012.00	8 681 716.00	AR-TD
266	488 409.79	8 680 843.90	AR-TD
267	488 134.00	8 680 915.00	AR-TD
268	487 547.00	8 681 324.00	AR-TD
269	493 304.70	8 684 533.36	AR-TD
270	491 727.14	8 685 723.35	AR-TD
271	491 268.00	8 686 517.00	AR-TD
272	491 267.82	8 685 278.59	AR-TD
273	490 881.53	8 686 352.80	AR-TD
274	490 099.36	8 684 278.35	AR-TD
275	490 305.00	8 685 157.00	AR-TD
276	490 289.86	8 684 773.12	AR-TD
277	491 810.00	8 684 020.00	AR-TD
278	488 651.00	8 683 030.00	AR-TD
279	488 799.00	8 682 854.00	AR-TD
280	490 076.00	8 678 230.00	AR-TD
281	489 805.00	8 679 193.00	AR-TD
282	491 783.84	8 686 838.74	GLA
283	491 961.64	8 686 749.84	GLA
284	492 291.84	8 686 210.09	GLA
285	492 926.84	8 685 619.53	GLA
286	492 901.44	8 685 454.43	GLA
287	493 416.00	8 684 953.00	GLA
288	493 422.14	8 685 340.13	GLA
289	493 786.00	8 684 805.00	GLA
290	493 859.00	8 684 608.00	GLA
291	493 894.58	8 684 383.82	GLA
292	493 631.00	8 684 472.00	GLA
293	493 799.00	8 684 307.00	GLA
294	493 982.00	8 684 203.00	GLA
295	493 546.00	8 684 689.00	GLA
296	493 973.00	8 684 296.00	GLA
297	493 149.00	8 685 546.00	GLA
298	493 095.00	8 685 756.00	GLA
299	492 945.23	8 685 810.26	GLA
300	492 480.00	8 686 157.00	GLA
301	491 721.42	8 686 695.02	GLA
302	492 811.00	8 685 344.00	GLA
303	491 923.01	8 687 156.59	GLA
304	493 289.00	8 685 229.00	GLA
305	492 767.03	8 685 936.06	GLA
306	493 770.86	8 684 959.49	GLA
307	492 981.34	8 685 357.42	GLA
308	493 360.23	8 685 090.72	GLA
309	491 941.00	8 686 599.00	GLA
310	492 559.00	8 685 917.00	GLA
311	493 542.00	8 685 143.00	GLA
312	491 262.39	8 684 358.99	BOF
313	490 574.48	8 684 819.36	BOF
314	489 120.00	8 683 393.00	BOF
315	490 015.00	8 682 678.00	BOF
316	485 145.00	8 680 811.00	BOF
317	486 174.00	8 679 460.00	BOF
318	480 048.00	8 680 820.00	BOF
319	480 393.00	8 680 468.00	BOF
320	489 168.00	8 681 009.00	BOF
321	491 282.00	8 683 819.00	BOF

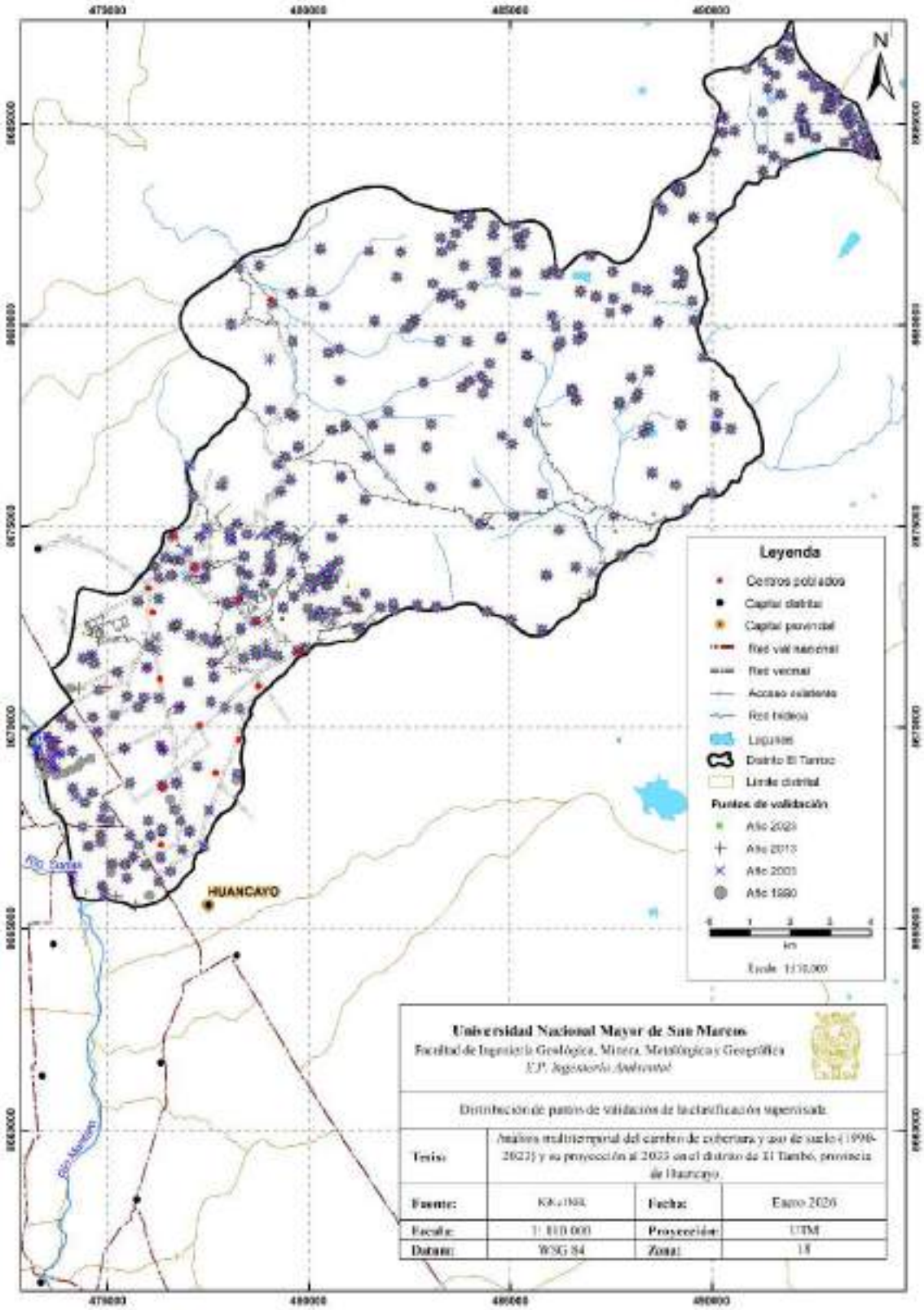
322	491 566.00	8 684 193.00	BOF
323	489 228.35	8 683 427.59	BOF
324	489 568.00	8 682 657.00	BOF
325	489 217.00	8 681 340.00	BOF
326	489 327.00	8 681 245.00	BOF
327	489 283.00	8 681 017.00	BOF
328	489 583.00	8 680 106.00	BOF
329	487 138.00	8 680 706.00	BOF
330	483 348.00	8 680 769.00	BOF
331	491 955.00	8 684 639.00	BOF
332	487 481.00	8 680 290.00	BOF
333	479 513.00	8 677 799.00	BOF
334	487 890.00	8 680 392.00	BOF
335	486 679.00	8 679 624.00	BOF
336	486 135.00	8 679 956.00	BOF
337	486 255.00	8 679 567.00	BOF
338	483 583.00	8 680 751.00	BOF
339	483 290.00	8 680 679.00	BOF
340	479 625.00	8 677 737.00	BOF
341	480 915.00	8 677 508.00	BOF
342	482 623.00	8 680 127.00	BOF

343	482 417.00	8 679 901.00	BOF
344	482 539.00	8 680 016.00	BOF
345	486 691.00	8 679 971.00	BOF
346	486 798.98	8 679 716.53	BOF
347	489 235.00	8 683 356.00	BOF
348	489 208.00	8 683 284.00	BOF
349	485 263.00	8 681 993.00	BOF
350	479 055.00	8 677 887.00	BOF
351	484 665.00	8 681 547.00	BOF
352	492 330.00	8 684 869.00	AGU
353	492 583.00	8 684 651.00	AGU
354	488 454.10	8 678 859.55	AGU
355	488 183.59	8 678 282.12	AGU
356	488 128.00	8 678 198.00	AGU
357	487 721.00	8 678 089.00	AGU
358	487 721.00	8 678 010.00	AGU
359	490 109.00	8 677 501.00	AGU
360	490 116.00	8 677 441.00	AGU
361	486 531.00	8 678 398.00	AGU
362	486 539.00	8 678 334.00	AGU
363	484 800.67	8 679 697.00	AGU

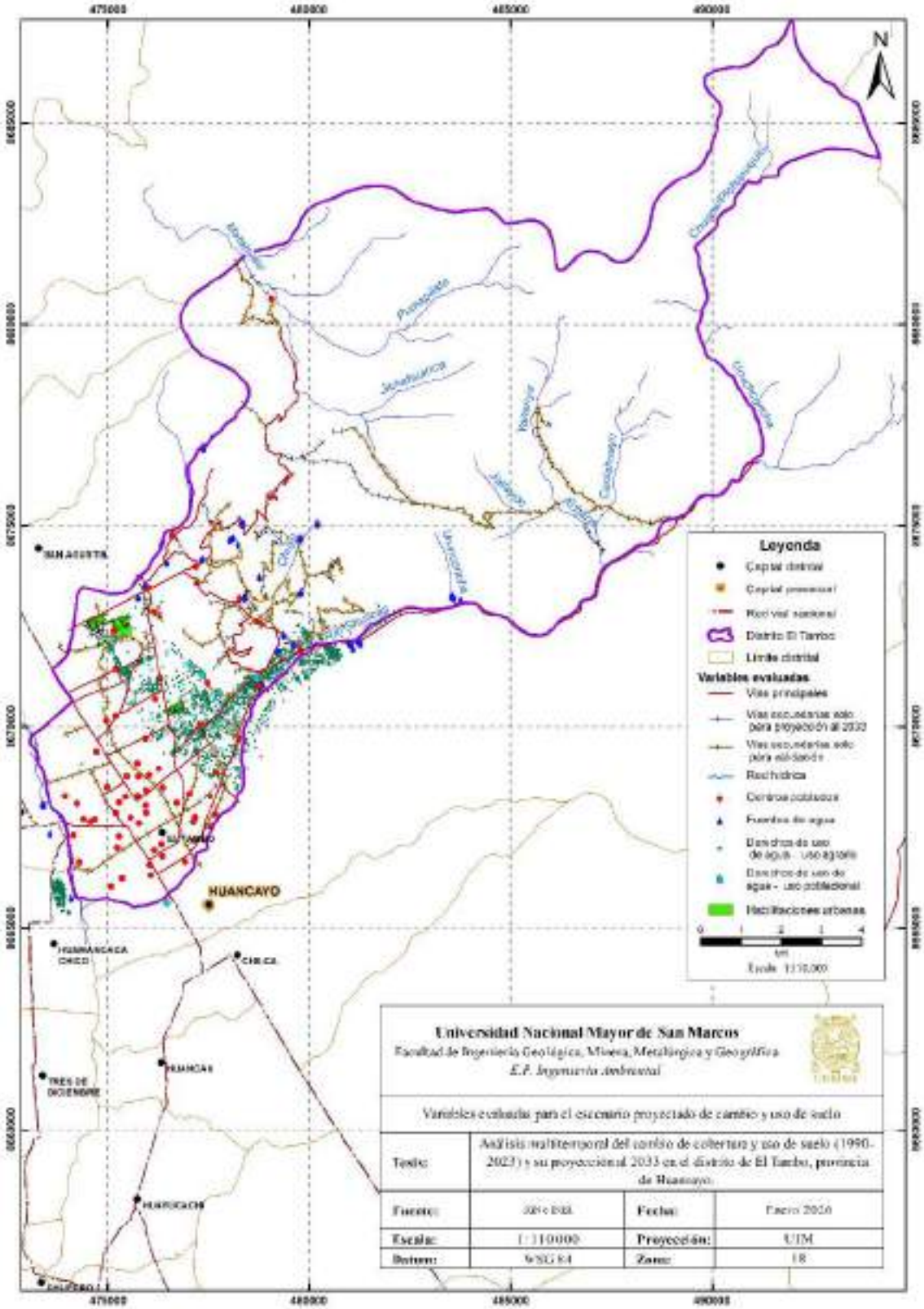
364	484 767.00	8 679 658.00	AGU
365	492 300.00	8 684 994.00	AGU
366	492 311.00	8 684 931.00	AGU
367	492 328.00	8 684 808.00	AGU
368	492 341.00	8 684 753.00	AGU
369	473 444.00	8 668 827.00	AGU
370	473 500.00	8 668 916.00	AGU
371	473 504.00	8 668 995.00	AGU
372	473 365.00	8 669 113.00	AGU
373	473 220.00	8 669 514.00	AGU
374	474 104.00	8 666 459.00	AGU
375	485 405.00	8 679 246.00	AGU
376	485 444.00	8 679 226.00	AGU

Nota: (AUR) Áreas urbanizadas, (CULT) Áreas agrícolas heterogéneas, (BOS) Bosque, (HERA) Herbazal abierto, (HERD) herbazal denso, (AR-TD) Afloramientos rocosos y tierras desnudas, (GLA) Glaciares, (BOF) Turberas y bofedales, (AGU) Cuerpos de agua.

Figura Distribución de puntos de validación de la clasificación supervisada



Anexo 8. Script para el Análisis de Intensidad de Cambio

```
library(raster)
library(diffeR)
library(intensity.analysis)

#### Ubicamos ruta/directorio de la carpeta donde estaremos trabajando

setwd("C:/Users/GAMER/Downloads/Informacion r/rst_betsy/result")


# Se lee y asigna una variable a cada raster con el que vamos a trabajar
raster_1990 <- raster("C:/Users/GAMER/Downloads/Informacion r/rst_betsy/Classif_1990.rst", package="intensity.analysis")

raster_2003 <- raster("C:/Users/GAMER/Downloads/Informacion r/rst_betsy/Classif_2003.rst", package="intensity.analysis")

raster_2013 <- raster("C:/Users/GAMER/Downloads/Informacion r/rst_betsy/Classif_2013.rst", package="intensity.analysis")

raster_2023 <- raster("C:/Users/GAMER/Downloads/Informacion r/rst_betsy/Classif_2023.rst", package="intensity.analysis")


# Make a list of raster objects.
raster.layers <- list(raster_1990, raster_2003, raster_2013, raster_2023)
#######################################################################

#### Superponemos el mapa de 1990/2009 y después 2009/2013 para generar matrices de cambio


# character vector of time points.
time.points <- c("1990","2003","2013","2023")

# character vector of land categories.
categories <- c("Aua","Cult","Bdx","Mmm","Mmo","Ve_ts","Sla","Bsr","Aua")


# Calling crosstabulation function.
crosstabulation <- multicrosstab(raster.layers, time.points, categories)
#Para ver las matrices cruzadas
crosstabulation

#####################################

## NIVEL DE INTENSIDAD ######

# Calling CIA(Category Intensity Analysis) function.
CIA.output <- CIA(crosstab(Matrix, time.points))


# set the filename argument to the directory you want to store the csv results.
filename <- file.path(normalizePath("C:/Users/GAMER/Downloads/Informacion r/rst_betsy/result", winslash = "/"), "CIA.csv")
write.csv(CIA.output.time.points, filename)

filename <- file.path(normalizePath("C:/Users/GAMER/Downloads/Informacion r/rst_betsy/result", winslash = "/"), "CIA.csv")
write.csv(CIA.output.time.points, filename)


## NIVEL DE CATEGORIA ######

# Calling CIA(Category Intensity Analysis) function.
CIA.output <- CIA(crosstab(Matrix, time.points, categories))


# set the filename argument to the directory you want to store the csv results.
filename <- file.path(normalizePath("C:/Users/GAMER/Downloads/Informacion r/rst_betsy/result", winslash = "/"), "CIA.csv")
write.csv(CIA.output.time.points, categories, filename)


## NIVEL DE TRANSITOS ######

# Calling TIA(Transition Intensity Analysis) function.
TIA.output <- TIA(crosstab(Matrix, time.points, categories))


filename <- file.path(normalizePath("C:/Users/GAMER/Downloads/Informacion r/rst_betsy/result", winslash = "/"), "TIA.csv")
write.csv(TIA.output.time.points, categories, filename)

"C:/Users/GAMER/Downloads/Informacion r/rst_betsy/result/"

plot (TIA.output)
```

Anexo 9. Variables evaluadas para la proyección de la cobertura y uso de suelo al 2033