

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



**PROPUESTA DE APLICACIÓN DEL MÉTODO DE ANÁLISIS
MULTICRITERIO CON EL SOFTWARE ARCGIS, PARA LA
SELECCIÓN EFICIENTE DE LA RUTA PRELIMINAR DE LA VÍA DE
EVITAMIENTO DE LA CIUDAD DE ABANCAY**

Tesis para obtener el título profesional de Ingeniero Civil

AUTORES:

Angello Gabriel Román Arias

Josue Arturo Aguilar Cano

ASESOR:

Mag. Ing. Fernando José Campos De la Cruz

Lima, setiembre de 2023

Informe de Similitud

Yo, Fernando José Campos De la Cruz,

docente de la Facultad de Ciencias e Ingeniería de la Pontificia

Universidad Católica del Perú, asesor(a) de la tesis/el trabajo de investigación titulado

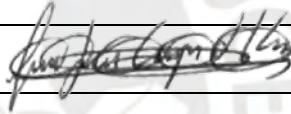
Propuesta de aplicación del Método de Análisis Multicriterio con el software ArcGIS, para la selección eficiente de la ruta preliminar de la Vía de Evitamiento de la ciudad de Abancay,

De los autores: Angello Gabriel Román Arias, y Josue Arturo Aguilar Cano,

dejo constancia de lo siguiente:

- El mencionado documento tiene un índice de puntuación de similitud de 16%. Así lo consigna el reporte de similitud emitido por el software *Turnitin* el 20/11/2023.
- He revisado con detalle dicho reporte y la Tesis o Trabajo de Suficiencia Profesional, y no se advierte indicios de plagio.
- Las citas a otros autores y sus respectivas referencias cumplen con las pautas académicas.

Lugar y fecha: 20 de noviembre del 2023

Apellidos y nombres del asesor: Campos De la Cruz, Fernando José	
DNI: 41469213	Firma 
ORCID: 0000-0002-7827-2861	

Resumen

Durante la etapa de planificación de un proyecto de carretera, la elaboración del diseño geométrico es muy importante, porque permite establecer las características geométricas en planta, de perfil y de sección transversal de la vía. Además, representa una tarea compleja, debido a que un mal diseño puede ocasionar retrabajos y el constante replanteo del mismo, ocasionando atrasos y pérdidas económicas en el proyecto. Es por tal motivo, que el trazo preliminar de la vía es muy importante, porque es la concepción a partir del cual se elaborarán las etapas del proceso de diseño. Por lo tanto, un trazo inicial realizado en base a mayores datos de entrada podrá definir un trazo preliminar eficiente a comparación de uno que considere menores criterios, como por ejemplo el método tradicional de la línea de gradiente.

Aplicar pocos criterios para obtener el trazo preliminar de la vía puede resultar poco eficiente durante las etapas del diseño geométrico e inclusive durante la ejecución del proyecto. Es por tal motivo, que el trabajo de tesis propone el uso del método de análisis multicriterio (AMC) como una herramienta que permite integrar diferentes criterios, principalmente de carácter técnico, social y ambiental, para obtener el trazo preliminar de una vía. Este método fue aplicado en el software ArcGIS, usando capas (o mapas) que contienen información geográfica y georreferenciada, que representan los criterios que fueron parametrizados en función a los objetivos del caso de estudio “Vía de Evitamiento de la Ciudad de Abancay”.

Finalmente, se obtuvo un trazo preliminar de la vía que contempla mayores parámetros y datos de entrada. Este fue comparado con otras dos propuestas obtenidas por el método tradicional. La comparación se realizó por medio de un proceso de análisis jerárquico que permitió discernir entre las alternativas evaluadas, resultando el trazo propuesto por el método de análisis multicriterio como el más eficiente, en función a criterios como longitud, pendiente longitudinal, sub-unidades geomorfológicas, cobertura vegetal, entre otros. Además, por medio del juicio de expertos, se concluyó que la propuesta llega a ser eficiente para proyectos con topografía compleja y múltiples factores a considerar, esperando que el uso del método propuesto minimice los replanteos y correcciones del trazo durante el proceso de diseño geométrico.

AGRADECIMIENTOS

Angello Gabriel Román Arias

Esta tesis está dedicada con profundo agradecimiento a mis padres, Arnaldo y Teresa, cuyo constante apoyo, sabios consejos e incansable esfuerzo fueron fundamentales en mi trayectoria académica. A mi hermano Elton, mi cómplice en las vicisitudes y quien siempre supo arrancarme sonrisas en los momentos álgidos de mi vida universitaria. Agradezco a mi gran amigo y también cómplice Josué, por su paciencia inquebrantable a lo largo de la elaboración de la tesis. También a nuestro asesor, el Mag. Ing. Fernando Campos, cuyas enseñanzas, paciencia y apoyo fueron esenciales para nuestro crecimiento profesional y la realización de esta tesis. Por último, expresar mi gratitud a mis abuelos, Jacoba y Paulino, quienes, a pesar de los desafíos propios de su edad, siempre mostraron genuino interés, preocupación y apoyo incondicional en mi camino. Estoy seguro de que continúan haciéndolo.

Josué Arturo Aguilar Cano

Agradezco el siempre apoyo incondicional de mis padres, Arturo y Susana, a lo largo de toda mi formación académica, así como su plena confianza. Agradezco también la persistencia y compromiso de mi compañero y gran amigo Angello y, por supuesto, al constante apoyo y hospitalidad de sus padres. Agradezco mi propia determinación para no rendirme, mi capacidad para mantener una actitud positiva día tras día y mi constante recordatorio de que la voluntad bien dirigida vence todos los obstáculos. Final e igualmente relevante, quiero manifestar mi gratitud a nuestro asesor, el Mag. Ing. Fernando Campos, por su orientación experta, sus valiosas sugerencias y gran apoyo en la elaboración de nuestra tesis.

ÍNDICE

RESUMEN	I
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I: DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	3
1.1. HIPÓTESIS	3
1.2. JUSTIFICACIÓN	3
1.3. OBJETIVOS	4
1.3.1. <i>Objetivo general</i>	4
1.3.2. <i>Objetivos específicos</i>	4
1.4. ALCANCE	5
CAPÍTULO II: ESTADO DEL ARTE	6
2.1. ANTECEDENTES.....	6
2.2. ETAPA DE PLANIFICACIÓN DE PROYECTOS VIALES	9
2.3. TRAZO DE LA RUTA PRELIMINAR DE UNA CARRETERA	10
2.3.1. <i>Selección de rutas</i>	10
2.3.2. <i>Evaluación de rutas</i>	11
2.3.3. <i>Método de la línea de gradiente</i>	11
2.4. SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG).....	12
2.4.1. <i>ArcGIS13</i>	
2.4.2. <i>QGIS 13</i>	
2.4.3. <i>Formato SIG ráster</i>	14
2.4.4. <i>Formato SIG vectorial</i>	15
2.5. ANÁLISIS MULTICRITERIO.....	16
2.5.1. <i>Proceso de toma de decisiones</i>	17
2.5.2. <i>Proceso de análisis jerárquico (AHP)</i>	18
CAPÍTULO III: METODOLOGÍA	24
3.1. PRESENTACIÓN DE PROPUESTAS	25
3.1.1. <i>Trazo preliminar de la carretera aplicando el método de análisis multicriterio en ArcGIS</i>	25

3.1.1.1.	Preparación de capas	25
3.1.1.2.	Superposición ponderada de capas	27
3.1.1.3.	Creación del coste de distancia y ruta de coste.....	27
3.1.1.4.	Automatización del modelo.....	28
3.1.2.	<i>Trazo preliminar de la carretera aplicando el método de la línea de gradiente en Civil3D.....</i>	28
3.2.	COMPARACIÓN DE PROPUESTAS.....	30
3.2.1.	<i>Proceso de análisis jerárquico (método AHP)</i>	30
3.2.2.	<i>Comparación a juicio de expertos.....</i>	31
CAPÍTULO IV: APLICACIÓN AL CASO DE ESTUDIO “VÍA DE EVITAMIENTO DE ABANCAY”		33
4.1.	MÉTODO DE ANÁLISIS MULTICRITERIO APLICADO EN ARCGIS PARA DETERMINAR EL TRAZO PRELIMINAR DE LA VÍA DE EVITAMIENTO DE LA CIUDAD DE ABANCAY	35
4.1.1.	<i>Preparación de capas</i>	35
4.1.1.1.	Selección y obtención de capas	35
4.1.1.2.	Conversión de capas.....	43
4.1.1.3.	Reclasificación de capas.....	48
4.1.2.	<i>Superposición ponderada de capas</i>	61
4.1.2.1.	Proceso de análisis jerárquico de capas participantes en Expert Choice 11.....	62
4.1.2.2.	Superposición ponderada de capas participantes en ArcMap	70
4.1.3.	<i>Creación del coste de distancia y ruta de coste.....</i>	72
4.1.4.	<i>Automatización del modelo.....</i>	80
4.2.	MÉTODO DE LA LÍNEA DE GRADIENTE APLICADO EN CIVIL3D PARA DETERMINAR EL TRAZO PRELIMINAR DE LA VÍA DE EVITAMIENTO DE LA CIUDAD DE ABANCAY	92
4.2.1.	<i>Obtención de mapa de curvas de nivel.....</i>	92
4.2.2.	<i>Extracción y exportación de capas de ArcMap a Civil3D.....</i>	94
4.2.3.	<i>Aplicación del Método de la Línea de Gradiente</i>	95
CAPÍTULO V: COMPARACIÓN DE PROPUESTAS		98
5.1.	PROCESO DE ANÁLISIS JERÁRQUICO (AHP) EN EXPERT CHOICE 11	98
5.2.	COMPARACIÓN A JUICIO DE EXPERTOS	123
CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		125
6.1.	CONCLUSIONES	125

6.2.	COMENTARIOS Y RECOMENDACIONES	127
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....		130
ANEXO N°1: DELIMITACIÓN DE LA ZONA DE INFLUENCIA PARA LA RUTA PROPUESTA		135
ANEXO N°2: CAMPOS SELECCIONADOS EN LAS TABLA DE ATRIBUTOS DE CADA CAPA PARTICIPANTE.....		136
ANEXO N°3: CONFIGURACIÓN DE LAS HERRAMIENTAS DE CONVERSIÓN A FORMATO RÁSTER		138
ANEXO N°4: CONFIGURACIÓN DE LAS HERRAMIENTA DE RECLASIFICACIÓN DE LAS CAPAS		146
ANEXO N°5: CONFIGURACIÓN DE LA HERRAMIENTA <i>RASTER CALCULATOR</i>		152
ANEXO N°6: CONFIGURACIÓN DE LA HERRAMIENTA <i>COST DISTANCE</i> (COSTE DE DISTANCIA)		154
ANEXO N°7: CONFIGURACIÓN DE LA HERRAMIENTA <i>COST PATH</i> (RUTA DE COSTE).....		156
ANEXO N°8: CONFIGURACIÓN DE LA HERRAMIENTA <i>RASTER TO POLYLINE</i>		158
ANEXO N°9: RUTA PROPUESTA POR EL MÉTODO DE ANÁLISIS MULTICRITERIO.....		185
ANEXO N°10: CONFIGURACIÓN DE LA HERRAMIENTA <i>CONTOUR</i>		185
ANEXO N°11: CONFIGURACIÓN DE LA HERRAMIENTA <i>EXPORT TO CAD</i>		186
ANEXO N°12: RUTA PROPUESTA POR EL MÉTODO DE LA LÍNEA DE GRADIENTE		185
ANEXO N°13: RUTAS PROPUESTAS POR EL MÉTODO DE LA LÍNEA DE GRADIENTE, CONSIDERANDO LA CAPA "CENTRO POBLADO"		185
ANEXO N°14: COMPARACIÓN ENTRE RUTAS EVALUADAS (PLANO EN ARCMAP).....		186
ANEXO N°15: COMPARACIÓN ENTRE RUTAS EVALUADAS (PLANO EN CIVIL3D).....		187
ANEXO N°16: COMENTARIOS DE INGENIEROS EXPERTOS EN PROYECTOS DE INFRAESTRUCTURA VIAL (JUICIO DE EXPERTOS).....		185

LISTA DE TABLAS

TABLA 1. ESCALA DE MEDIDAS DE SAATY (1991).....	19
TABLA 2. CRITERIOS A INCLUIR EN EL ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS DE INFRAESTRUCTURAS DE TRANSPORTES.....	35
TABLA 3. CRITERIOS PARA LA EVALUACIÓN DE TRES RUTAS DE CARRETERA.....	36
TABLA 4. CRITERIOS CONSIDERADOS PARA LA OBTENCIÓN DEL TRAZO DE RUTA PRELIMINAR PROPUESTO	38
TABLA 5. CAPAS PARTICIPANTES EN EL MODELAMIENTO DE LA RUTA PRELIMINAR PROPUESTA CON EL APLICATIVO ARCMAP	38
TABLA 6. CAPAS PARTICIPANTES EN EL MODELO CON SUS RESPECTIVAS FUENTES	42
TABLA 7. CAMPOS SELECCIONADOS EN CADA UNA DE LAS CAPAS PARTICIPANTES.....	47
TABLA 8. COMPONENTES (DATOS) QUE CONFORMAN EL CAMPO SUB_UNI	49
TABLA 9. RECLASIFICACIÓN DEL CAMPO SUB_UNI, DE LA CAPA SUB-UNIDADES GEOMORFOLÓGICAS	51
TABLA 10. RECLASIFICACIÓN DE VALORES DE LA CAPA PENDIENTES.....	53
TABLA 11. RECLASIFICACIÓN DE VALORES DE LA CAPA PELIGROS GEOLÓGICOS	54
TABLA 12. RECLASIFICACIÓN DEL CAMPO DESCRIPCIO, DE LA CAPA CENTRO POBLADO.....	54
TABLA 13. RECLASIFICACIÓN DEL CAMPO NOM_COMUNI, DE LA CAPA COMUNIDADES CAMPESINAS.....	55
TABLA 14. RECLASIFICACIÓN DEL CAMPO DESCRIPCIO, DE LA CAPA PREDIOS RURALES.....	56
TABLA 15. COMPONENTES (DATOS) QUE CONFORMAN EL CAMPO COBVEG2013.....	56
TABLA 16. RECLASIFICACIÓN DEL CAMPO COBVEG2013, DE LA CAPA COBERTURA VEGETAL	58
TABLA 17. RECLASIFICACIÓN DEL CAMPO ANP_CATE, DE LA CAPA ÁREA NATURAL PROTEGIDA	59

TABLA 18. RECLASIFICACIÓN DEL CAMPO C_NOMB, DE LA CAPA ZONA DE AMORTIGUAMIENTO	59
TABLA 19. VALORES PONDERADOS DE LOS CRITERIOS TERCARIOS	69
TABLA 20. TRAZOS PRELIMINARES PROPUESTOS PARA LA VÍA DE EVITAMIENTO DE LA CIUDAD DE ABANCAY.....	98
TABLA 21. CRITERIOS CONSIDERADOS PARA EVALUAR LOS TRAZOS MEDIANTE EL MÉTODO AHP	100
TABLA 22. LONGITUDES DE LOS TRAZOS PRELIMINARES PROPUESTOS.....	104
TABLA 23. PENDIENTES LONGITUDINALES DE LOS TRAZOS PRELIMINARES PROPUESTOS	106



LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. INTEGRACIÓN DE MAPAS, DATOS Y ANÁLISIS EN UN SIG.....	13
FIGURA 2. CELDAS (O PÍXELES) DE CAPA EN FORMATO RÁSTER.....	15
FIGURA 3. REPRESENTACIÓN DE PUNTOS, LÍNEAS Y POLÍGONOS EN FORMATO VECTORIAL ...	15
FIGURA 4. COMPARACIÓN ENTRE CAPAS EN FORMATO DEL TIPO VECTORIAL Y RÁSTER.....	16
FIGURA 5. RADIO DE CÍRCULO L PARA EL TRAZO DE LA LÍNEA GRADIENTE.....	30
FIGURA 6. DEPARTAMENTO, PROVINCIA Y CIUDAD DE ABANCAY	33
FIGURA 7. FOTO PANORÁMICA DE LA CIUDAD DE ABANCAY	34
FIGURA 8. CAPAS PARTICIPANTES EN EL MODELO PARA OBTENER EL EJE PRELIMINAR PROPUESTO	43
FIGURA 9. CAPAS PARTICIPANTES DE INICIO Y FIN DE LA VÍA EN EL MODELO PROPUESTO.....	43
FIGURA 10. HERRAMIENTAS DE CONVERSIÓN DEL APLICATIVO ARCMAP	45
FIGURA 11. HERRAMIENTA PARA IDENTIFICAR LA TABLA DE ATRIBUTOS DE CADA CAPA PARTICIPANTE.....	46
FIGURA 12. TABLA DE ATRIBUTOS DE LA CAPA SUB-UNIDADES GEOMORFOLÓGICAS EN EL APLICATIVO ARCMAP	46
FIGURA 13. CAPAS PARTICIPANTES CONVERTIDAS A FORMATO RÁSTER.....	48
FIGURA 14. HERRAMIENTA DE RECLASIFICACIÓN DEL APLICATIVO ARCMAP.....	60
FIGURA 15. CAPAS PARTICIPANTES RECLASIFICADAS.....	61
FIGURA 16. VENTANA INICIAL DE CONFIGURACIÓN DE EXPERT CHOICE 11	62
FIGURA 17. VENTANA DE GUARDADO EN RUTA DE SALIDA	63
FIGURA 18. DESCRIPCIÓN DEL OBJETIVO.....	63
FIGURA 19. ESTRUCTURA JERÁRQUICA DEL MÉTODO AHP DEL CASO DE ESTUDIO	64
FIGURA 20. INSERCIÓN DE NODOS	64
FIGURA 21. NODOS DE LOS CRITERIOS PRIMARIOS Y SECUNDARIOS	65

FIGURA 22. NODOS DE LOS CRITERIOS PRIMARIOS, SECUNDARIOS Y TERCARIOS.....	65
FIGURA 23. APARTADO DE CONFIGURACIÓN DE LA MATRIZ DE COMPARACIÓN DE CRITERIOS	66
FIGURA 24. MATRIZ DE COMPARACIÓN ENTRE CRITERIOS PRIMARIOS.....	66
FIGURA 25. MATRIZ DE COMPARACIÓN ENTRE CRITERIOS TERCARIOS (GEOLOGÍA).....	66
FIGURA 26. MATRIZ DE COMPARACIÓN ENTRE CRITERIOS TERCARIOS (PUNTOS DE CONTROL)	67
FIGURA 27. MATRIZ DE COMPARACIÓN ENTRE CRITERIOS TERCARIOS (ECOSISTEMAS).....	67
FIGURA 28. VERIFICACIÓN DE LA RELACIÓN DE CONSISTENCIA EN LAS MATRICES DE COMPARACIÓN.....	68
FIGURA 29. APARTADO DE CONFIGURACIÓN DE LOS GRÁFICOS DE SENSIBILIDAD DINÁMICA	68
FIGURA 30. GRÁFICO DE SENSIBILIDAD DINÁMICA, RESULTANTE DEL PROCESO DE ANÁLISIS JERÁRQUICO EN EXPERT CHOICE 11	69
FIGURA 31. UBICACIÓN DE LA HERRAMIENTA RASTER CALCULATOR.....	71
FIGURA 32. CAPA RESULTANTE DE LA SUPERPOSICIÓN PONDERADA DE LAS CAPAS RECLASIFICADAS	72
FIGURA 33. UBICACIÓN DE LA HERRAMIENTA COST DISTANCE.....	73
FIGURA 34. CAPA DE COSTE DE DISTANCIA	74
FIGURA 35. CAPA DE BACKLINK DE LA CAPA COSTE DE DISTANCIA.....	75
FIGURA 36. UBICACIÓN DE LA HERRAMIENTA COST PATH	77
FIGURA 37. CAPA RUTA DE COSTE	77
FIGURA 38. UBICACIÓN DE LA HERRAMIENTA RASTER TO POLYLINE.....	78
FIGURA 39. CAPA RUTA DE COSTE EN FORMATO VECTORIAL.....	78
FIGURA 40. CAPA DE RUTA PROPUESTA POR EL MÉTODO DE ANÁLISIS MULTICRITERIO (AMC)	79

FIGURA 41. COMPARACIÓN ENTRE CAPA DE SUPERPOSICIÓN PONDERADA Y CAPA DE RUTA PROPUESTA	80
FIGURA 42. UBICACIÓN DE LA HERRAMIENTA MODELBUILDER EN ARCMAP	81
FIGURA 43. CAPAS PARTICIPANTES	82
FIGURA 44. APLICATIVO MODELBUILDER DE ARCMAP	82
FIGURA 45. ESTRUCTURA DE PROCESOS AUTOMATIZADOS CON MODELBUILDER.....	83
FIGURA 46. ESTRUCTURA DETALLADA DE LA AUTOMATIZACIÓN DE LOS PROCESOS CON MODELBUILDER.....	83
FIGURA 47. AUTOMATIZACIÓN DE LAS HERRAMIENTAS DE CONVERSIÓN A FORMATO RÁSTER	85
FIGURA 48. EJECUCIÓN DEL MODELO CON EL BOTÓN RUN.....	85
FIGURA 49. AUTOMATIZACIÓN DE LAS HERRAMIENTAS DE RECLASIFICACIÓN.....	87
FIGURA 50. AUTOMATIZACIÓN DE LA HERRAMIENTA RASTER CALCULATOR.....	88
FIGURA 51. OPCIÓN ADD TO DISPLAY DE LA CAPA DE SALIDA.....	88
FIGURA 52. CAPA DE SUPERPOSICIÓN PONDERADA, OBTENIDA MEDIANTE LA AUTOMATIZACIÓN DE PROCESOS	89
FIGURA 53. AUTOMATIZACIÓN DE LA HERRAMIENTA COST DISTANCE.....	90
FIGURA 54. AUTOMATIZACIÓN DE LA HERRAMIENTA COST PATH	91
FIGURA 55. AUTOMATIZACIÓN DE LA HERRAMIENTA RASTER TO POLYLINE.....	91
FIGURA 56. CAPA DE RUTA PROPUESTA POR EL MÉTODO DE ANÁLISIS MULTICRITERIO (AMC), MODELO AUTOMATIZADO.....	92
FIGURA 57. HERRAMIENTA CONTOUR, PARA LA OBTENCIÓN CURVAS DE NIVEL	93
FIGURA 58. MAPA DE CURVAS DE NIVEL	93
FIGURA 59. FUNCIÓN EXPORT TO CAD	94
FIGURA 60. CAPAS EXPORTADAS DE ARCMAP A CIVIL3D.....	95

FIGURA 61. TRAZO PRELIMINAR OBTENIDO POR EL MÉTODO DE LA LÍNEA DE GRADIENTE.....	96
FIGURA 62. TRAZO PRELIMINAR QUE CONSIDERA EL CASCO URBANO DE LA CIUDAD DE ABANCAY	97
FIGURA 63. TRAZOS EVALUADOS POR MEDIO DEL MÉTODO AHP	99
FIGURA 64. JERARQUÍA DE LAS VARIABLES EN EL PROCESO DE ANÁLISIS JERÁRQUICO (AHP)	101
FIGURA 65. DATOS DE ENTRADA EN EL SOFTWARE EXPERT CHOICE 11.....	102
FIGURA 66. MATRIZ DE COMPARACIÓN DE LA VARIABLE GOAL: RUTA EFICIENTE.....	103
FIGURA 67. MATRIZ DE COMPARACIÓN DE LA VARIABLE CRITERIOS BASE	103
FIGURA 68. MATRIZ DE COMPARACIÓN DE LA VARIABLE GEOLOGÍA	103
FIGURA 69. MATRIZ DE COMPARACIÓN DE LA VARIABLE PUNTOS DE CONTROL	104
FIGURA 70. MATRIZ DE COMPARACIÓN DE LA VARIABLE ECOSISTEMAS.....	104
FIGURA 71. MATRIZ DE COMPARACIÓN DE LA VARIABLE LONGITUD	105
FIGURA 72. MATRIZ DE COMPARACIÓN DE LA VARIABLE PENDIENTE LONGITUDINAL	106
FIGURA 73. COMPARACIÓN VISUAL DE LOS TRAZOS SOBRE LA CAPA SUB-UNIDADES GEOMORFOLÓGICAS	107
FIGURA 74. MATRIZ DE COMPARACIÓN DE LA VARIABLE SUB-UNIDADES GEOMORFOLÓGICAS	108
FIGURA 75. COMPARACIÓN VISUAL DE LOS TRAZOS SOBRE LA CAPA PENDIENTES.....	109
FIGURA 76. MATRIZ DE COMPARACIÓN DE LA VARIABLE PENDIENTES.....	109
FIGURA 77. COMPARACIÓN VISUAL DE LOS TRAZOS SOBRE LA CAPA PELIGROS GEOLÓGICOS	110
FIGURA 78. MATRIZ DE COMPARACIÓN DE LA VARIABLE PELIGROS GEOLÓGICOS.....	111
FIGURA 79. COMPARACIÓN VISUAL DE LOS TRAZOS SOBRE LA CAPA CENTRO POBLADO	112
FIGURA 80. MATRIZ DE COMPARACIÓN DE LA VARIABLE CENTRO POBLADO	112

FIGURA 81. COMPARACIÓN VISUAL DE LOS TRAZOS SOBRE LA CAPA COMUNIDADES CAMPELINAS.....	113
FIGURA 82. MATRIZ DE COMPARACIÓN DE LA VARIABLE COMUNIDADES CAMPELINAS	114
FIGURA 83. COMPARACIÓN VISUAL DE LOS TRAZOS SOBRE LA CAPA PREDIOS RURALES	115
FIGURA 84. MATRIZ DE COMPARACIÓN DE LA VARIABLE PREDIOS RURALES	115
FIGURA 85. COMPARACIÓN VISUAL DE LOS TRAZOS SOBRE LA CAPA COBERTURA VEGETAL	116
FIGURA 86. MATRIZ DE COMPARACIÓN DE LA VARIABLE COBERTURA VEGETAL.....	117
FIGURA 87. COMPARACIÓN VISUAL DE LOS TRAZOS SOBRE LA CAPA ÁREA NATURAL PROTEGIDA	118
FIGURA 88. MATRIZ DE COMPARACIÓN DE LA VARIABLE ÁREA NATURAL PROTEGIDA.....	118
FIGURA 89. COMPARACIÓN VISUAL DE LOS TRAZOS SOBRE LA CAPA ZONA DE AMORTIGUAMIENTO	119
FIGURA 90. MATRIZ DE COMPARACIÓN DE LA VARIABLE ZONA DE AMORTIGUAMIENTO.....	120
FIGURA 91. GRÁFICO DE SENSIBILIDAD DINÁMICA FINAL	121
FIGURA 92. GRÁFICO DE SENSIBILIDAD DE RENDIMIENTO FINAL.....	122

Introducción

Las carreteras son infraestructuras viales muy importantes que permiten el adecuado traslado de los medios de transporte terrestre; sin embargo, antes de encontrarse en funcionamiento, pasan por un proceso de planificación, en el cual se toman decisiones con respecto al trazo de la ruta, diseño geométrico y otros aspectos. En la etapa de planificación, el proyectista define el trazo de la ruta preliminar por donde se emplazará la carretera, en función a los requerimientos del proyecto. Además, cuenta con métodos como, por ejemplo, la línea de gradiente, también llamada “línea de ceros”, que “es aquella línea que, pasando por los puntos obligados del proyecto, conserva la pendiente uniforme especificada y que, de coincidir con el eje de la carretera, éste no aceptaría cortes ni rellenos” (Cárdenas Grisales, 2015). No obstante, dicho método se enfoca solo en los criterios de pendiente longitudinal y distancia para minimizar los movimientos de tierra, y en consecuencia los costos.

Un Sistema de Información Geográfica (SIG) permite crear, administrar, analizar y representar cartográficamente datos, conectando un mapa que integra su ubicación con todo tipo de información descriptiva. Es decir, superpone mapas, datos y realiza diferentes tipos de análisis (esri, s.f.), llevados a cabo mediante softwares como ArcGIS y QGIS. Por otra parte, en la toma de decisiones, el análisis multicriterio se posiciona como un recurso de apoyo fundamental, muy útil durante la etapa de planificación, ya que permite integrar diferentes criterios, fomentando la participación de los involucrados o especialistas en la toma de decisiones, con el objetivo de minimizar la subjetividad y encontrar las soluciones más apropiadas (Pohekar & Ramachandran, 2004).

A partir de lo mencionado anteriormente, se propone la aplicación del método de análisis multicriterio por medio del aplicativo ArcMap, del software ArcGIS. El programa integra los diferentes criterios que se consideran durante la etapa de planeamiento, entre ellos los aspectos técnicos, sociales y ambientales. Por lo tanto, se genera una solución que busca

minimizar correcciones y replanteos de trazo durante las posteriores etapas de diseño. Entonces se podrían evitar contratiempos que lleven al retraso y pérdidas económicas en el proyecto, resultando en un trazo preliminar eficiente obtenido gracias la integración de mayores parámetros de entrada.



Capítulo I: Descripción del Problema

1.1. Hipótesis

El trazo de la ruta preliminar obtenido por el método de análisis multicriterio (AMC), integra de manera sencilla y eficiente los criterios considerados en la etapa de diseño de la fase de planificación del proyecto, aplicado en el software ArcGIS. Además, minimiza el retrabajo ante cualquier modificación o replanteo de los diseños, porque automatiza los procesos para obtener diferentes soluciones de forma práctica.

1.2. Justificación

Ante la gran demanda de proyectos de infraestructura vial, como las carreteras, se deben evitar problemas como demoras, sobrecostos, perjuicios sociales y afectaciones al medio ambiente. Ello convierte a cada proyecto complejo, debido a la particularidad de criterios que se deben tener en consideración para cada uno de ellos.

Por lo tanto, se vuelve importante realizar la toma de decisiones adecuadas durante la etapa de planificación, en la cual se seleccionará la ruta por donde se emplazará la carretera, para posteriormente realizar el diseño geométrico. Entonces, a partir de un adecuado trazo de la ruta, se espera minimizar el número de replanteos y las correcciones sobre el posterior diseño geométrico y ejecución, además de minimizar los problemas mencionados en el párrafo anterior. Por esta razón se vuelve imprescindible realizar un trazo preliminar del eje de la carretera eficiente, que considere múltiples criterios para evitar los contratiempos durante las posteriores etapas de diseño o ejecución del proyecto.

El método de la línea de gradiente no termina de integrar de manera eficaz y automatizada los criterios, los cuales deben ser considerados a partir de la participación de profesionales en cada área involucrada del proyecto. Dicho método tiene un mayor enfoque en el aspecto económico, de acuerdo con la cantidad de movimiento de tierra, y es por esa razón

que se vuelve indispensable la propuesta de un método que simplifique la integración de diversos criterios y facilite la toma de decisiones al momento de realizar el trazo y seleccionar la mejor alternativa posible.

Un claro ejemplo, es el tiempo y los sobrecostos generados en el caso de la Vía de Evitamiento de Abancay, debido a problemas con el cambio de ruta, saneamiento de terrenos, interferencias, ubicación errónea de botaderos de desmonte, entre otros inconvenientes. Ello condujo al retraso de la ejecución de la carretera durante más de un año, como consecuencia de una mala planificación, en la cual, de forma coordinada, se pudo haber integrado de mejor manera los criterios de los diferentes especialistas responsables del proyecto, para obtener resultados eficientes.

1.3.Objetivos

1.3.1. *Objetivo general*

Proponer un método, que permita identificar y seleccionar el trazo preliminar más eficiente del eje de una carretera, mediante la aplicación del método de análisis multicriterio en el software ArcGIS.

1.3.2. *Objetivos específicos*

- Presentar el estado situacional de la Vía de Evitamiento de la ciudad de Abancay.
- Describir los criterios técnicos, sociales y ambientales del caso de estudio.
- Caracterizar geográfica y descriptivamente el área de la zona de estudio, a través de un software de sistema de información geográfica (SIG).
- Elaborar una propuesta que permita obtener un trazo preliminar eficiente, aplicando el método de análisis multicriterio en ArcGIS.
- Comparar las alternativas de ruta preliminar obtenidas mediante el método de análisis multicriterio en ArcGIS y el método de la línea de gradiente en Civil 3D.

1.4. Alcance

El presente trabajo de tesis abarca los temas relacionados a la etapa de planificación de proyectos de carreteras, además del uso de sistemas de información geográfica (SIG) y su aplicación mediante el software ArcGIS, para obtener el trazo de ruta preliminar eficiente, a partir de la teoría de análisis multicriterio. Se considera eficiente debido a que resulta imprescindible llevar a cabo un trazo preliminar del eje de carretera que integre diversos criterios, determinados por los diferentes especialistas involucrados. El propósito es minimizar posibles contratiempos durante el diseño geométrico y la posterior ejecución de la vía.

Al aplicar el método AMC en ArcGIS, para el caso de estudio, se considerarán tres criterios importantes, el técnico, social y ambiental. Siendo el aspecto económico inherente a cada uno de ellos. A partir de los cuales se desarrollarán subcriterios, que serán integrados en una capa restrictiva que permita delimitar el trazo preliminar mediante el método propuesto. El trazo obtenido, será comparado con los hallados a partir del método de la línea de gradiente o también llamada línea de ceros. Y dicha comparación se llevará a cabo mediante un proceso de análisis jerárquico, también conocido como AHP, por sus siglas en inglés de *Analytic Hierarchy Process*, en el cual se considerarán diversos criterios, como longitud, pendiente, cobertura vegetal, área natural protegida, entre otros. Además, se realizará una comparación a juicio de expertos entre las propuestas presentadas.

Los softwares a usar para el desarrollo del método AMC serán ArcMap (aplicativo de ArcGIS) y Expert Choice 11. Siendo este último importante para realizar el método AHP y poder asignar valores de importancia relativos de los criterios a considerar en el modelo del caso de estudio. Por otra parte, para la aplicación del método de la línea de gradiente, se usará el software Civil3D, y ArcMap para obtener el mapa de curvas de nivel.

Capítulo II: Estado del Arte

En el presente capítulo se aborda la etapa de planificación, la cual es importante en el desarrollo de proyectos de infraestructura vial, porque busca minimizar los contratiempos que se pueden presentar durante el desarrollo del mismo. Además, se presentan como antecedentes trabajos de investigación que abordan temas sobre la selección adecuada de la ruta preliminar del eje de una carretera. En ellos se propone el método AMC, con el fin de lograr una evaluación integral de los impactos técnicos, sociales y ambientales. Por otra parte, se presentan teorías y definiciones que se abarcan en el desarrollo de la presente tesis, con el fin de una correcta comprensión e interpretación de los posteriores capítulos.

2.1. Antecedentes

La ciudad de Abancay se caracteriza por ser una zona con importante actividad comercial, conformada por diversos mercados orientados a acopiar productos de regiones cercanas, en su mayoría relacionados a la agricultura (mashua, papa y cebada) y la crianza de ganado. La población de este departamento es mayormente rural. Además, se encuentran minas importantes como Las Bambas, donde se explota cobre, y Aymaraes, donde se explota hierro. Estos representan una esperanza para la economía local muy deprimida. Sin embargo, esta provincia sufre problemas con su planificación urbana, como la alta congestión vehicular y permanentes accidentes de tránsito en las principales avenidas de la ciudad.

Por lo expuesto anteriormente, se vuelve necesario la construcción de una vía de evitamiento que descongestione y evite el tránsito vehicular, de modo que los vehículos pesados (transporte interprovincial y de alta carga) no circulen por el centro de la ciudad, y en consecuencia disminuyan los altos costos operativos y accidentes de tránsito.

De acuerdo al “Estudio definitivo para la construcción de la Vía de Evitamiento de la ciudad de Abancay” (VERA & MORENO S.A., 2016), durante la etapa de planificación se

contaron con 2 alternativas para el trazo del eje de la carretera; sin embargo, en la práctica, no fue posible seguir el trazo seleccionado. Ello debido a problemas como el cruce de la vía por zonas urbanas y rurales con terrenos agrícolas, mala ubicación de botaderos de desmonte, entre otros. En consecuencia, el diálogo con los pobladores se complicó, generando conflictos sociales que retrasaron la continuidad del proyecto. Es por esa razón que la empresa consultora tuvo que diseñar un tercer trazo que implicó más tiempo y costo, lo cual pudo haber sido evitado a partir de un adecuado trabajo durante las etapas iniciales del proyecto.

En la etapa de planificación se suele trabajar bajo el enfoque del análisis costo-beneficio (CBA), basado en prácticas comunes, considerando factores monetarios como ahorro de tiempo, seguridad, inversión y costos operativos. Estas prácticas integran el tratamiento de factores ambientales y sociales mediante procedimientos informales para ser incorporados a los resultados del CBA (Hayashi & Morisugi, 2000). No obstante, Stephan Tischler (2017) presenta una propuesta bajo un enfoque integral que combina el análisis tradicional costo-beneficio con el análisis multicriterio y la integración de la consulta pública, cuyo objetivo final es lograr la aceptabilidad, confirmabilidad y transparencia del proyecto.

El enfoque propuesto parte del análisis espacial, en el que se lleva a cabo un análisis integral del área de la zona del proyecto. Con respecto a los procedimientos de selección de rutas en los países occidentales, los operadores de infraestructura de transporte y las autoridades de aprobación han desarrollado sus propios enfoques convencionales basados en estándares nacionales, procesos internos bien establecidos o simplemente prácticas comunes (Tischler, 2017).

Muñoz y Romana (2016), en un trabajo de investigación, ofrecen una evaluación de las estrategias utilizadas en la toma de decisiones multicriterio y su representación matemática. Además, exponen una metodología que de manera secuencial emplea diversos métodos de

decisión para analizar alternativas en investigaciones relacionadas con infraestructuras. Resaltan la importancia de considerar múltiples criterios en la toma de decisiones y se exploran diferentes métodos para evaluar alternativas, centrándose en AHP y VIKOR como los más utilizados. El método VIKOR se destaca como una herramienta eficaz para el análisis de alternativas en infraestructuras de transporte, con sus procesos y criterios detallados. Se enfatiza la relevancia de los estudios informativos en la planificación de infraestructuras y se clarifica la diferencia entre estudios informativos y de viabilidad. Además, proponen una metodología que combina AHP y VIKOR, aplicándola a un caso de acceso al Puerto Exterior A Coruña (España), empleando AHP para evaluar la importancia relativa de cada criterio y VIKOR para establecer un orden de preferencia entre las alternativas. Se llega a la conclusión de que la metodología sugerida garantiza resultados confiables y soluciones estables incluso ante pequeñas modificaciones en el análisis de alternativas en investigaciones sobre infraestructuras de transporte.

Effat y Hassan (2013), presentan una investigación en la que evalúan el diseño de tres rutas alternativas de carreteras en la península del Sinaí, Egipto. Utilizando el método AHP y el análisis de la Ruta de Menor Costo, determinaron que la ruta híbrida era la opción más eficiente y menos costosa, considerando factores ambientales y económicos. El estudio utilizó el software ArcGIS de ESRI para crear una base de datos geográfica y diseñar las rutas, y se tuvieron en cuenta criterios como la pendiente, el tipo de roca, las fallas, la cobertura del suelo, los sitios arqueológicos y las áreas protegidas. Se encontró que la ruta híbrida era la mejor alternativa, ya que evitaba obstáculos como las dunas de arena y las áreas protegidas. Adicionalmente, el análisis resalta la efectividad de los sistemas de información geográfico y la evaluación de la Ruta de Menor Costo en la planificación de rutas, sugiriendo la realización de investigaciones complementarias previas a la toma de una decisión definitiva.

María del Carmen Tejero (2015), en su trabajo de investigación de fin de máster, se enfoca en la selección de una ruta de carretera utilizando modelos de toma de decisiones multicriterio. Utiliza el método AHP y la Técnica para la Orden de Preferencia por Similitud a la Solución Ideal (TOPSIS) para evaluar los criterios y seleccionar la mejor ruta. El caso de estudio se realiza en la carretera A-315 en Cuevas del Campo, Granada (España). Se realiza un análisis comparativo con otros métodos de toma de decisiones multicriterio, obteniendo la mejor alternativa. Además, sugiere líneas futuras de trabajo, como el uso de un software específico, considerar diferentes tipos de información para valorar los criterios, incluir otros métodos de decisión y realizar un análisis de sensibilidad. Asimismo, se propone la inclusión de un mayor número de profesionales especializados en el proceso de toma de decisiones.

2.2.Etapa de Planificación de Proyectos Viales

De acuerdo con Cárdenas Grisales (2015), la etapa de planificación de proyectos de carreteras se encuentra compuesta por tres fases: prefactibilidad, factibilidad y diseños definitivos. En las cuales se evalúa de forma progresiva la viabilidad del proyecto, siendo el factor relevante el económico.

- **Prefactibilidad:** En esta fase se realiza el trazo preliminar de las rutas que serán propuestas en la fase de factibilidad. Es decir, se realiza una aproximación de las posibles rutas en función a las particularidades de la zona de estudio (geología, hidrología, fuente de materiales, entre otros) y a la evaluación económica resultante. Por lo tanto, se evalúa a rasgos generales la viabilidad de cada uno de los trazos propuestos, por medio de indicadores como Beneficio / Costo o la Tasa Interna de Retorno.

- **Factibilidad:** En función al trazo seleccionado en la primera fase, se realiza el diseño geométrico preliminar, es decir, el diseño del eje en planta. Verificando las compatibilidades con las diferentes especificaciones técnicas y estructuras complementarias, propias del proyecto. Luego, se procede a realizar una evaluación económica que tendrá menor grado de

incertidumbre, debido a que ya se cuentan con los prediseños. Por lo tanto, en esta fase se define la continuidad o no del proyecto, dependiendo de su rentabilidad.

- **Diseños Definitivos:** Luego de haber definido la continuidad del proyecto, por ser económicamente viable, se procede a realizar los diseños a nivel de detalle de las estructuras que formarán parte del proyecto de carretera. Estos son el diseño geométrico de todos los elementos y el diseño de las obras complementarias que serán requeridas. Para luego ser llevadas a la etapa de ejecución del proyecto.

2.3. Trazo de la Ruta Preliminar de una Carretera

2.3.1. Selección de rutas

De acuerdo con el Manual de Carreteras D.G - 2018, carretera se define como “camino para el tránsito de vehículos motorizados de por lo menos dos ejes, cuyas características geométricas, deben cumplir las normas técnicas vigentes.” Además, señala que la selección de ruta, para el emplazamiento de la carretera, debe realizarse en función a la topografía y factibilidad de uso del terreno, los cuales deben reunir las condiciones requeridas para el proyecto (Ministerio de Transportes y Comunicaciones - MTC, 2018).

Cárdenas Grisales (2015) describe la ruta como una “franja de terreno de ancho variable” la cual pasa por puntos de control primario u obligatorios (poblaciones, puertos, áreas de producción y otros) y puntos de control secundarios o de menor importancia (cruce de ríos bosques, caseríos y otros), debido a razones técnicas, políticas, económicas o sociales. Además, cabe resaltar que los puntos intermedios permiten el desarrollo de rutas alternas a lo largo de la vía principal.

Para la selección de la ruta se deben considerar criterios de ingeniería básica, como por ejemplo la topografía, hidrología, hidráulica, drenaje, geología, geotecnia, impacto ambiental, estudio de seguridad vial, protección de restos arqueológicos, entre otros. Los cuales deben ser tomados en cuenta para la adecuada identificación de la posible ruta por donde se trazará el eje

de la carretera (MTC, 2018). Por otra parte, como se mencionó anteriormente, la selección también se da en función de la evaluación económica correspondiente a las rutas propuestas, en las cuales se analiza la rentabilidad de la viabilidad del proyecto.

2.3.2. Evaluación de rutas

Se evalúan los diversos trazos propuestos en función de criterios de ingeniería básica (como topografía, hidrología, geología, entre otros) y se estiman de manera aproximada los gastos asociados con la construcción, operación y mantenimiento. Esto se hace con el objetivo de comparar los posibles beneficios entre los trazos, buscando lograr el menor costo junto con los mayores índices de utilidad económica, social y estética (Cárdenas Grisales, 2015).

El método de Bruce es uno de los más difundidos para la evaluación de rutas. Se fundamenta en el concepto de longitud resistente, también conocida como longitud virtual, que contrasta la distancia real de la ruta con su equivalente en un terreno plano. Este enfoque evalúa los esfuerzos exigidos a los vehículos al ascender pendientes pronunciadas, así como el riesgo de desgaste de los frenos durante descensos. “Tomando en cuenta únicamente el aumento de longitud correspondiente al esfuerzo de tracción en las pendientes” (Cárdenas Grisales, 2015). Permitiendo seleccionar la mejor ruta entre las alternativas propuestas.

2.3.3. Método de la línea de gradiente

El método de la línea de gradiente, conocido también como línea de pendiente o de ceros, se emplea para la planificación de vías, poniendo énfasis en el manejo de pendientes y curvas. Su enfoque consiste en configurar rutas fluidas y económicas al reducir las inclinaciones pronunciadas y las curvaturas abruptas. Este enfoque se logra mediante la creación de una línea continua que se ajusta a la topografía del terreno y conecta puntos de paso en las curvas de nivel. Al mantener pendientes uniformes y alinear esta línea con el eje de

la carretera, se busca reducir las excavaciones y terraplenes, optimizando el diseño de la infraestructura vial y minimizando su impacto en el ambiente (Cárdenas Grisales, 2015).

2.4.Sistemas de Información Geográfica (SIG)

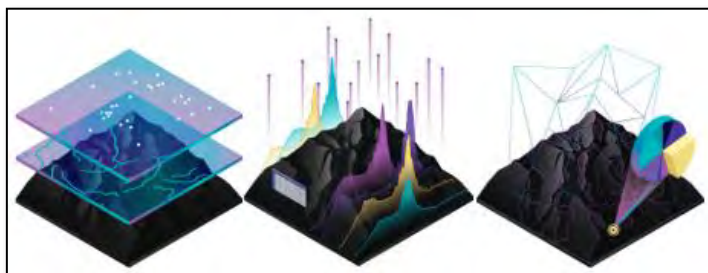
Un SIG es una herramienta informática, capaz de gestionar y analizar la información georreferenciada. Además, soluciona problemas de carácter medioambiental y territorial. “Es un sistema de información compuesto por hardware, software y procedimientos para capturar, manejar, manipular, analizar, modelizar y representar datos georreferenciados con el objetivo de resolver problemas de gestión y planificación” (López Lara, Posada Simeón, & Moreno Navarro, 1998). El desarrollo de sistema de información geográfica ocurrió durante la transición del formato analógico a digital. Esto conllevó a realizar un trabajo georreferenciado más eficiente, con más información y con una mejor velocidad de acceso a los datos empleados (López et al., 1998).

De acuerdo con Domínguez Bravo (2000), existen 5 argumentos básicos para la utilización de los SIG y son los siguientes:

- Permite comparar entre perspectivas y escalas simulando cierta capacidad de representación de distintos lugares al mismo tiempo.
- Permite contrastar cambios cualitativos y cuantitativos; aportando gran capacidad de cálculo.
- Permite administrar grandes volúmenes de información a distintas escalas y proyecciones.
- Permite integrar datos tabulares y geográficos con cálculos sobre variables (topología).
- Admiten múltiples aplicaciones y desarrollos; además, dispone herramientas informáticas estandarizadas.

Figura 1

Integración de mapas, datos y análisis en un SIG.



Nota. El gráfico representa la forma en que se integran los mapas temáticos, los datos georreferenciados y el análisis que se puede realizar en un SIG. Adaptado de *¿Qué son los SIG?*, esri, s.f., (<https://www.esri.com/es-es/what-is-gis/overview>).

2.4.1. ArcGIS

Es un software y sistema completo, desarrollado por ESRI (*Environmental Systems Research Institute*), que permite el manejo, recopilación y administración de toda información geográfica. ArcGIS se emplea en diferentes aplicaciones, en las que se incluyen la planificación y análisis, administración de activos, comprensión del funcionamiento de las operaciones y otros. Adicionalmente, posibilita la creación de diversos tipos de mapas, incluyendo mapas web de fácil acceso. En ArcGIS un mapa se concibe como un mapa inteligente que exhibe, combina y resume capas de información geográfica y descriptiva. Adicionalmente, cuenta con una gran disponibilidad de mapas en diferentes especialidades, como geología, hidrología, uso de suelos, entre otros (esri Chile, s.f.).

De acuerdo con Olaya (2014), ArcGIS Desktop representa la pieza central de la suite de aplicaciones de ESRI llamada ArcGIS, siendo el software que alberga las funciones tradicionales de un Sistema de Información Geográfica (SIG) de escritorio. Asimismo, integra herramientas que facilitan la visualización y gestión de datos geográficos, y presenta una arquitectura extensible que posibilita la incorporación de nuevas funcionalidades.

2.4.2. QGIS

De acuerdo a la web oficial de QGIS Project (s.f.), QGIS, también conocido como Quantum GIS, representa un SIG de código abierto que simplifica la visualización, análisis y

administración de datos geoespaciales. Su inicio en 2002 y consolidación en SourceForge tienen como propósito democratizar el acceso a las funcionalidades de los SIG, anteriormente limitadas por costosas soluciones.

Compatible con diversas plataformas como Unix, Windows y macOS, su interfaz amigable se basa en la tecnología Qt y C++, lo que posibilita su incluso uso en dispositivos Android e iOS. Inicialmente concebido como un visor de datos SIG, QGIS ha evolucionado para abordar distintas necesidades, abarcando desde la representación y captura de datos hasta análisis avanzados y la creación detallada de mapas, resaltando su flexibilidad en el manejo de diversos formatos de datos vectoriales y ráster gracias a su arquitectura de complementos.

Distribuido bajo la Licencia Pública General GNU (GPL), su código fuente accesible asegura un programa gratuito y adaptable, permitiendo su modificación y distribución sin restricciones, consolidándose como una valiosa herramienta en el ámbito de la información geoespacial.

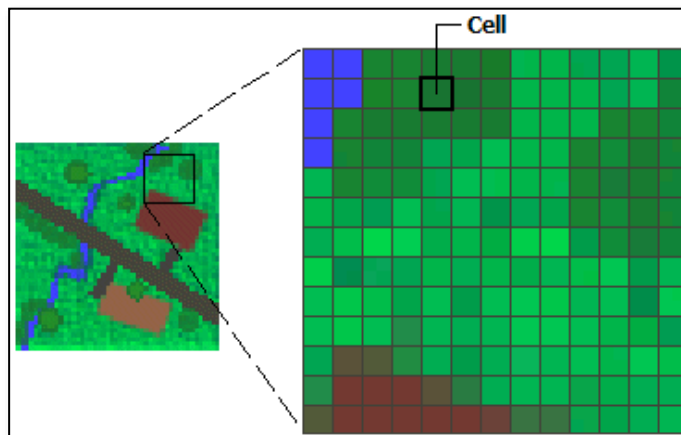
2.4.3. Formato SIG ráster

Los datos ráster se encuentran formados por matrices de celdas o píxeles, donde cada una de ellas posee información, por ejemplo, el tipo de suelo. Por lo tanto, cada pixel del ráster emula información del mundo real (ArcGIS for Desktop, s.f.).

Entre sus ventajas se encuentran los siguientes puntos:

- Estructura datos, a través de píxeles, que pueden ser identificados en la tabla de atributos.
- Facilita el análisis espacial y estadístico.
- Representa superficies continuas, facilitando su análisis.
- Almacena puntos, líneas, polígonos y superficies uniformemente.
- Permite superponer *datasets* (conjunto de datos) complejos.

Figura 2
Celdas (o píxeles) de capa en formato ráster

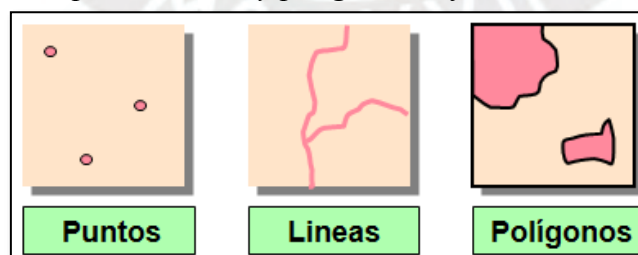


Nota. El gráfico representa a una capa en formato ráster que se encuentra formado por un conjunto de celdas (o píxeles). Tomado de *¿Qué son los datos ráster?*, ArcGIS for Desktop, s.f., (<https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/manage-data/raster-and-images/what-is-raster-data.htm>).

2.4.4. Formato SIG vectorial

Los datos tipo vector se encuentran representados por puntos, líneas y polígonos, basados en componentes espaciales de los datos geográficos. “Cada entidad de puntos se representa como un par de coordenadas simple, mientras que las entidades de línea y de polígonos se representan como listas ordenadas de vértices”. A diferencia del formato SIG ráster, a cada entidad vector se le asocia una característica o atributo, mientras que en datos ráster, la característica o atributo es asociado a cada celda o píxel (esri, s.f.).

Figura 3
Representación de puntos, líneas y polígonos en formato vectorial

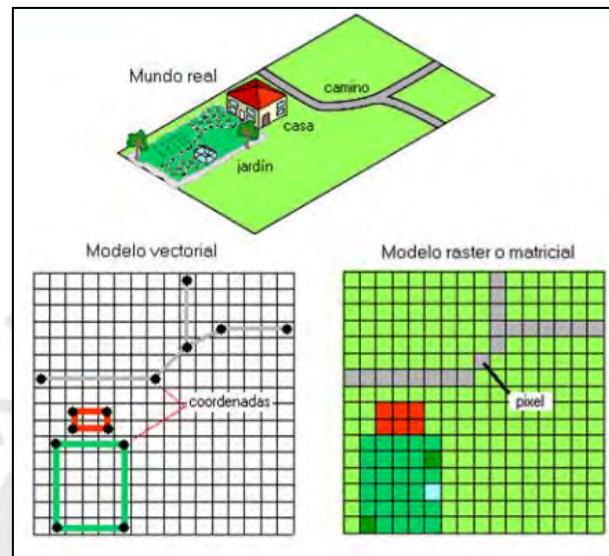


Nota. El gráfico representa a capas en formato vectorial del tipo puntos, líneas y polígonos, respectivamente. Adaptado de *Vector vs Raster: ¿Cuál es la diferencia entre estos tipos de formatos de datos espaciales GIS?*, ECOSCRIPT, s.f., (<https://ecoscript.org/vectorvsraster/>).

A continuación, se presenta la diferencia entre una capa que posee datos en formato vectorial, y su representación en formato ráster. En ella se puede observar que el modelo ráster se encuentra conformado por píxeles y el modelo vector por puntos, líneas y polígonos.

Figura 4

Comparación entre capas en formato del tipo vectorial y ráster



Nota. El gráfico representa la misma capa expresada en formato vectorial (puntos, líneas y polígonos) y en formato ráster (píxeles). Tomado de *Introducción a los Sistemas de Información Geográfica*, F.J. Dávila Martínez, s.f., (<https://sge.org/ibercarto/wp-content/uploads/sites/4/2016/01/sig2.pdf>).

2.5. Análisis Multicriterio

Es una herramienta de apoyo que ayuda a tomar decisiones para poder resolver problemas complejos en la etapa de planificación de un proyecto. En ella intervienen diferentes actores con diferentes puntos de vista, permitiendo integrar criterios en un solo marco de análisis (EcuRed, s.f.).

El análisis multicriterio se configura como una herramienta que facilita la toma de decisiones más informada durante la etapa de planificación, ya que logra integrar la diversas dimensiones, objetivos, actores y escalas presentes de dicho proceso (Arancibia Carbajal & Contreras Villablanca, 2016). Su aplicación en un software SIG, como ArcGIS, puede resultar beneficioso al momento de seleccionar el trazo preliminar de una carretera, en la cual se ingresarán variables a tomar en cuenta durante la etapa de planificación, como, por ejemplo,

pendiente, longitud y puntos de paso, para que se genere de forma simplificada o automatizada, mediante un análisis espacial, un trazo eficiente y en consecuencia la selección adecuada. Además, este tipo de análisis también puede ser aplicado para distintos propósitos, como por ejemplo elaborar mapas de peligro, vulnerabilidad y riesgo, delimitar áreas protegidas, entre otras aplicaciones.

Entonces, usar un software SIG permite reducir los errores de diseño y la falta de comunicación, lo que a su vez reduce los riesgos del proyecto (Zhao, Liu, & Mbachu, 2019), debido a que su base de datos, que son un conjunto de datos organizados e interrelacionados, formado por una o varias tablas, permite identificar zonas con peligros geográficos y ambientalmente sensibles de forma detallada (Ludeña & Rodríguez Rivero, 2010).

2.5.1. *Proceso de toma de decisiones*

El proceso de toma de decisiones es el estudio de identificar y elegir alternativas basadas en los valores y preferencias del tomador de decisiones. Tomar una decisión implica que hay opciones a considerar (criterios) en las alternativas, y en tal caso no solo queremos identificar tantas alternativas como sea posible, sino elegir la que mejor se adapte a nuestras metas, objetivos, deseos, valores, etc. (Harris, 1998).

Es muy importante distinguir que se tienen problemas en el que se considera un solo criterio (monocriterio) y aquellos en los que se consideran múltiples criterios (multicriterio). Además, de si estos poseen alternativas finitas o infinitas. Si las alternativas de decisión son finitas, se realiza un Análisis Multicriterio Discreto. En cambio, cuando el problema involucra una gama infinita de valores resulta en un conjunto incontable de alternativas, se lleva a cabo un Análisis Multicriterio Continuo (Muñoz & Romana, 2016).

El presente trabajo de tesis, abarca el desarrollo del análisis multicriterio discreto, el cual posee dos grandes grupos, los métodos de la Teoría de la Utilidad Multi-atributo o MAUT,

por sus siglas en inglés y los Métodos de Superación u Outranking. En el primero, la base es el uso de la función de utilidad, el cual el tomador de decisiones trata de maximizar agregando los diferentes criterios que forman parte del problema. Y los métodos de superación, que se encuentran basados en la teoría de las relaciones de superación (Fülöp, 2005).

El método a usar en la presente tesis es el Proceso de Análisis Jerárquico (AHP), el cual forma parte de los métodos de la teoría utilidad multi-atributo. Este método fue desarrollado por Thomas Saaty en los años 60, y es ampliamente usado. La metodología se fundamenta en la evaluación de comparaciones entre pares, con el propósito de asignar ponderaciones a los diferentes criterios y dar prioridad a las diferentes alternativas. Esto posibilita determinar la importancia de cada criterio en relación con los demás (Muñoz & Romana, 2016).

2.5.2. Proceso de análisis jerárquico (AHP)

Creado por Thomas Saaty en el década de 1960, este método evalúa opciones que involucran múltiples criterios mediante la comparación de pares de elementos, empleando matrices y conceptos de álgebra matricial para establecer prioridades entre las alternativas (Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres, 2019).

Durante el proceso, la persona encargada de tomar decisiones debe ofrecer evaluaciones subjetivas según la importancia relativa de cada criterio y, posteriormente, expresar sus preferencias en relación con las distintas alternativas de decisión. “El resultado del AHP es una jerarquización con prioridades que muestran la preferencia global para cada una de las alternativas de decisión” (Toskano y Bruno, 2005).

De acuerdo con Osorio y Orejuela (2008), sus principales ventajas son:

- Es posible analizar cómo los cambios en un nivel superior impactan al nivel inferior.
- Ofrece información acerca del sistema y posibilita obtener una visión amplia de los actores, sus objetivos y propósitos.

- Proporcionan la capacidad de adaptarse a cambios en los componentes de manera que no alteren la estructura global.

De acuerdo con Osorio y Orejuela (2008), el método AHP se detalla en 3 axiomas:

- Axioma recíprocal: Si en relación a un criterio, la alternativa “X” es evaluada como n veces superior a “Y”, entonces “Y” es considerada como n veces inferior a “X”. Este concepto se emplea en la evaluación matricial que se lleva a cabo en los criterios y las alternativas. El análisis se realiza en ambas direcciones.
- Axioma de homogeneidad: Los elementos que son sometidos a comparación no deben presentar diferencias en términos de la característica que está siendo evaluada.
- Axioma de la síntesis: Las evaluaciones de prioridad entre elementos en una jerarquía no están influenciadas por los elementos del nivel más bajo. En algunos análisis, este principio no se aplica debido a que podría existir una conexión entre la importancia de un objetivo y el nivel más bajo de la jerarquía.

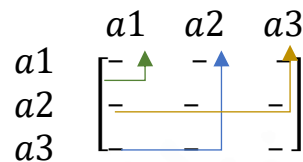
El proceso de análisis jerárquico, permite realizar comparaciones entre los diferentes criterios y alternativas a través de factores cuantitativos y cualitativos, debido a que se compara con su propia escala de medida, propuesta por Saaty. Esta escala contiene valores de 1 al 9, como se observa en la tabla 1 (Salas Bacalla, Leyva Caballero, & Calenzani Fiestas, 2014).

Tabla 1
Escala de medidas de Saaty (1991)

Escala Verbal	Escala Numérica
Absolutamente o muchísimo más importante que ...	9
Mucho más importante o preferido que ...	7
Más importante o preferido que ...	5
Ligeramente más importante o preferido que ...	3
Igual a ...	1
Ligeramente menos importante o preferido que ...	1/3
Menos importante o preferido que ...	1/5
Mucho menos importante o preferido que ...	1/7
Absolutamente o muchísimo más preferido que ...	1/9
Valores intermedios entre dos juicios de preferencia adyacentes	2,4,6,8

Nota. Esta tabla muestra la escala de valores verbal y numérica propuesta por Thomas Saaty. Adaptado de *Manual para la evaluación del riesgo originado por fenómenos naturales v3.0*, CENEPRED, 2019.

A continuación, se demuestra el desarrollo del método AHP, utilizando 3 elementos de comparación, denominados “a1”, “a2” y “a3”. Para generar la matriz de comparación, se colocan los elementos como cabeceras en las columnas y filas de la matriz.



Luego, en función a la escala de medidas de Saaty, se designan valores a la matriz de comparación, manteniendo la relación “fila/columna”, completando toda- la matriz.

$$\begin{array}{c}
 \\
 a1 \\
 a2 \\
 a3
 \end{array}
 \begin{array}{c}
 a1 \\
 a2 \\
 a3
 \end{array}
 \begin{bmatrix}
 1 & 7 & 5 \\
 1/7 & 1 & 1/3 \\
 1/5 & 3 & 1
 \end{bmatrix}$$

Donde se interpretan los elementos de las cabeceras, en el orden columna/fila, de la siguiente forma:

- a1 es igual a a1
- a1 mucho más importante o preferido que a2
- a1 es más importante o preferido que a3
- a2 es mucho menos importante o preferido que a1
- a2 es igual a a2
- a2 es ligeramente menos importante o preferido que a3
- a3 es menos importante o preferido que a1
- a3 es ligeramente más importante o preferido que a2
- a3 es igual a a3

Después de completar la matriz de comparación, se debe verificar que los valores asignados sean apropiados, es decir, consistentes. Para ello, se determina el valor de la Relación Consistencia (RC), que se determina siguiendo el siguiente procedimiento.

- **Paso 1:** Se halla la matriz normalizada, para ello se determina el valor inverso de la sumatoria de cada columna de la matriz de comparación. Luego, se multiplica por cada valor de la columna que le corresponde.

$$\begin{array}{r}
 \begin{array}{c} a1 \\ a2 \\ a3 \end{array} \begin{array}{ccc} a1 & a2 & a3 \\ \left[\begin{array}{ccc} 1 & 7 & 5 \\ 1/7 & 1 & 1/3 \\ 1/5 & 3 & 1 \end{array} \right] \\ \\ \Sigma \\ 1/\Sigma \end{array} \\
 \begin{array}{ccc} 1.34 & 11.00 & 6.33 \\ 0.74 & 0.09 & 0.16 \end{array}
 \end{array}$$

- 1ra columna: $0.74 \times 1 = 0.74$, $0.74 \times 1/7 = 0.11$ y $0.74 \times 1/5 = 0.15$
- 2da columna: $0.09 \times 7 = 0.63$, $0.09 \times 1 = 0.09$ y $0.09 \times 3 = 0.27$
- 3ra columna: $0.16 \times 5 = 0.80$, $0.16 \times 1/3 = 0.05$ y $0.16 \times 1 = 0.16$

Obteniendo la siguiente matriz normalizada:

$$\begin{array}{c} a1 \\ a2 \\ a3 \end{array} \begin{array}{ccc} a1 & a2 & a3 \\ \left[\begin{array}{ccc} 0.74 & 0.63 & 0.80 \\ 0.11 & 0.09 & 0.05 \\ 0.15 & 0.27 & 0.16 \end{array} \right]
 \end{array}$$

- **Paso 2:** Se determina el vector prioridad, cuyos valores representan los pesos ponderados de cada elemento. Para ello, se calcula el promedio de cada fila de la matriz normalizada.

$$\begin{array}{c} a1 \\ a2 \\ a3 \end{array} \begin{array}{ccc} a1 & a2 & a3 \\ \left[\begin{array}{ccc} 0.74 & 0.63 & 0.80 \\ 0.11 & 0.09 & 0.05 \\ 0.15 & 0.27 & 0.16 \end{array} \right] \rightarrow \left[\begin{array}{c} (0.74 + 0.63 + 0.80) \div 3 \\ (0.11 + 0.09 + 0.05) \div 3 \\ (0.15 + 0.27 + 0.16) \div 3 \end{array} \right]
 \end{array}$$

Obteniendo el siguiente vector de prioridad:

$$\begin{bmatrix} a1 \\ a2 \\ a3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.727 \\ 0.083 \\ 0.193 \end{bmatrix}$$

- **Paso 3:** Se comprueba que los valores asignados posean una relación de consistencia (RC) menor a 0.10, que señala que los criterios usados para la comparación por pares fueron idóneos. Para ello, previamente, se debe determinar el vector suma ponderado y el Índice de Consistencia (IC).

Para obtener el vector suma ponderado, se multiplica la matriz de comparación con el vector prioridad, luego se suman las filas de la matriz, resultando en un vector, cuyos valores serán divididos con los del vector prioridad.

$$\begin{bmatrix} 1 & 7 & 5 \\ 1/7 & 1 & 1/3 \\ 1/5 & 3 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0.727 \\ 0.083 \\ 0.193 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.727 & 0.581 & 0.965 \\ 0.104 & 0.083 & 0.064 \\ 0.145 & 0.249 & 0.193 \end{bmatrix}$$

- 1ra fila: $1 \times 0.727 = 0.727$, $7 \times 0.083 = 0.581$ y $5 \times 0.193 = 0.965$
- 2da fila: $1/7 \times 0.727 = 0.104$, $1 \times 0.083 = 0.083$ y $1/3 \times 0.193 = 0.064$
- 3ra fila: $1/5 \times 0.727 = 0.145$, $3 \times 0.083 = 0.249$ y $1 \times 0.193 = 0.193$

$$\begin{bmatrix} 0.727 + 0.581 + 0.965 \\ 0.104 + 0.083 + 0.064 \\ 0.145 + 0.249 + 0.193 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2.273 \\ 0.251 \\ 0.587 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 2.273 \\ 0.251 \\ 0.587 \end{bmatrix} \begin{matrix} \rightarrow \\ \rightarrow \\ \rightarrow \end{matrix} \begin{bmatrix} 0.727 \\ 0.083 \\ 0.193 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3.127 \\ 3.024 \\ 3.041 \end{bmatrix}$$

Luego, se determina el valor del índice de consistencia (IC), que se encuentra en función del promedio de los valores del vector suma ponderado (λ) y el número de elementos del vector de prioridades (n).

$$IC = \frac{\lambda - n}{n - 1} = \frac{3.064 - 3}{3 - 1} = 0.032$$

- $\lambda = (3.127 + 3.024 + 3.041) / 3 = 3.064$
- $n = 3$

Después, se halla la relación de consistencia (RC), como el cociente del índice de consistencia (IC) por el Índice Aleatorio (IA). Este último, se encuentra en función del número de elementos del vector prioridad (n), para lo cual se usaron los valores establecidos en Aguarón y Moreno (2003).

n	3	4	5	6	7	8	9
IA	0.525	0.882	1.115	1.252	1.341	1.404	1.452

n	10	11	12	13	14	15	16
IA	1.484	1.513	1.535	1.555	1.570	1.583	1.595

$$RC = \frac{IC}{IA} = \frac{0.032}{0.525} = 0.061 (< 0.10, \text{correcto})$$

Finalmente, luego de verificar que la relación de consistencia (RC) tiene un valor menor a 0.10, se considera que los valores asignados en la matriz de comparación son adecuados. En caso, el valor de RC sea mayor a 0.10, entonces se debe analizar y asignar nuevos valores a la matriz inicial.

Capítulo III: Metodología

La metodología de la investigación constó de cinco fases principales: revisión de la literatura y estado del arte sobre los temas abordados, recopilación de la información del caso de estudio y criterios a tener cuenta, la elaboración del trazo de la ruta preliminar por medio del método AMC en ArcGIS, la elaboración del trazo de la ruta preliminar por medio del método de la línea de gradiente en Civil3D, y finalmente la comparación entre las rutas obtenidas por ambos métodos.

En la primera fase se abordó la recopilación de información sobre los temas relacionados al trazo preliminar eficiente de una ruta. Entre ellos, estudios de investigación sobre la aplicación del método de análisis multicriterio en ArcGIS, sistemas de información geográfica, análisis multicriterio, proceso de toma de decisiones, proceso de análisis jerárquico, entre otros. A partir de la información abordada y explicada, para una mejor comprensión del trabajo, se procedió con la segunda fase.

En la segunda fase se realizó la búsqueda de información importante del caso de estudio “Vía de Evitamiento de Abancay” con el objetivo de obtener los criterios a tener en consideración para el desarrollo de las propuestas de ruta preliminar durante la etapa de planeamiento. Además, se recopiló información de diferentes fuentes, como casos de estudio, investigaciones afines, normas técnicas vigentes, libros, la opinión de un experto en el desarrollo de proyectos viales y también la opinión de una experta en sistemas de información geográfica.

La tercera fase constó en la aplicación del método AMC en el aplicativo ArcMap, del software ArcGIS, para obtener la ruta preliminar eficiente entre dos puntos. El método fue aplicado bajo dos criterios, es decir, se realizó un modelo no automatizado, y un modelo automatizado. En el segundo modelo, se automatizaron los procesos para la obtención de la

propuesta. Para ambos casos, la ruta propuesta se obtuvo luego de haber seleccionado los criterios y subcriterios considerados, cuyas capas temáticas fueron descargadas desde distintas fuentes, como los geovisores de las diversas entidades del estado peruano.

La cuarta fase se enfocó en la elaboración del trazo de la ruta preliminar de la carretera mediante el método de la línea de gradiente en el software Civil3D. Se realizaron tres trazos, una que fue propuesta con el método tradicional, y otras dos considerando una capa adicional (ciudad de Abancay) sobre las curvas de nivel. Ello se hizo con el fin de que puedan ser comparadas con el trazo obtenido por el método propuesto en el presente trabajo de tesis.

Finalmente, en la quinta fase, se establecieron dos procedimientos de análisis para realizar una comparación objetiva entre los trazos obtenidos por el método propuesto y el método de la línea de gradiente. Los procedimientos para la comparación y evaluación de propuestas, fueron el método AHP, en el cual se tomaron en cuenta diversos criterios, y también la comparación de propuestas por medio del juicio de expertos.

A continuación, se detalla la metodología de las propuestas, para la obtención del trazo de la ruta preliminar, por medio del método AMC en ArcGIS y el método de la línea de gradiente en Civil3D.

3.1. Presentación de Propuestas

3.1.1. Trazo preliminar de la carretera aplicando el método de análisis multicriterio en ArcGIS

3.1.1.1. Preparación de capas

Dentro de ArcMap, aplicación principal de ArcGIS, se modela bajo el uso de capas, las cuales contienen información geográfica referente a una fuente de datos. Dichas capas pueden ser representadas como puntos, líneas, polígonos o superficies. Por lo tanto, para la aplicación del análisis multicriterio en ArcMap, fue indispensable identificar las capas de interés, bajo

criterios que se consideran relevantes durante la etapa de planificación, con el fin de obtener el trazo eficiente de la ruta preliminar. Entre los criterios, pueden ser considerados el desempeño económico, los valores sociales, los impactos ambientales de la infraestructura vial, la seguridad y comodidad de los viajes, la preservación del paisaje, inclusive algunos aspectos sociales y políticos (Zopounidis & Doumpos, 2017).

Los métodos de análisis de decisiones multicriterio son desarrollados conjuntamente por tomadores de decisiones (partes interesadas), expertos y analistas de decisiones (Urošević & Marinović, 2021). Los cuales se encuentran involucrados en diferentes áreas durante la etapa de planificación del proyecto. Por otra parte, se tuvo en consideración que cada criterio puede estar compuesto por uno o más subcriterios, y estos por otros más.

Luego de identificar los criterios a tener en cuenta para el modelamiento en ArcMap, se procedió a realizar la búsqueda bibliográfica, con el fin de obtener las capas referentes a dichos criterios. Para ello, fue indispensable que la información de cada capa sea la más actual; no obstante, se recomienda verificar en campo su veracidad, para no tener problemas durante las posteriores etapas del proyecto. Después de haber obtenido las capas con las que se trabajó, se editaron y delimitaron en función al área o zona del proyecto.

Las capas se pueden encontrar en formato vectorial o ráster; no obstante, para el propósito de realizar un análisis multicriterio, para lo cual es indispensable realizar una superposición ponderada entre las capas, fue necesario que estas se encuentren en formato ráster (ArcGIS Enterprise, s.f.). Por lo tanto, las capas con datos vectoriales obtenidas, fueron transformadas a formato ráster.

Luego de transformar a formato ráster cada capa participante, fueron reclasificadas en función a los requerimientos de cada criterio tomado en cuenta durante la etapa de

planificación. Por lo tanto, los procesos ejecutados en ArcMap, para “Preparación de capas” fueron: la conversión a formato ráster y la reclasificación de cada una de las capas participantes.

3.1.1.2.Superposición ponderada de capas.

La superposición ponderada de las capas participantes se realizó con la finalidad de que se superpongan y se conjuguen en una sola capa restrictiva, es decir, que restrinja y priorice determinadas áreas o superficies representadas en la nueva capa. Permitiendo realizar evaluaciones multicriterio para resolver problemas de decisión.

Cada capa representa un criterio bajo el cual fue tomado en cuenta como “capa participante”. Por lo tanto, para realizar la superposición ponderada, se tiene que establecer la importancia relativa de cada una de ellas. Por lo tanto, se realizó el método AHP, en el cual, a través de matrices de comparación entre los diferentes criterios, determina el porcentaje de importancia relativo que posee cada una de las capas a superponer.

Como se mencionó en párrafos anteriores, para realizar la superposición ponderada de las capas, estas deben encontrarse en formato ráster y reclasificadas en función a los criterios tomados en cuenta, previamente, por los tomadores de decisiones.

3.1.1.3.Creación del coste de distancia y ruta de coste

En esta etapa del modelamiento, se obtuvo de forma gráfica el trazo de la ruta preliminar de la carretera, desde su punto de inicio hasta el punto final de la misma. Para ello, luego de haber realizado los procedimientos anteriormente explicados, se aplicaron las herramientas de coste de distancia (*Cost distance*) y ruta de coste (*Cost path*) en el aplicativo ArcMap. Herramientas con las cuales se determinó la ruta preliminar eficiente, en función a los criterios preestablecidos.

La herramienta coste de distancia, calcula la distancia de menor coste acumulativo, es decir, busca la ruta menos costosa en función de la distancia, atributos de la superficie, entre

otras características (esri, s.f.) . Por otra parte, la herramienta ruta de coste, calcula la ruta de menor coste desde las ubicaciones elegidas hasta la celda de inicio más cercana (esri, s.f.). Como resultado, se obtiene el trazo de la ruta preliminar propuesta, en formato ráster, que luego se transformó a formato vectorial para determinar sus características geométricas, como la distancia.

3.1.1.4. Automatización del modelo.

Todos los procesos mencionados anteriormente, desde preparación de capas hasta la creación del coste de distancia y ruta de coste, fueron automatizados con el objetivo de hacer modificaciones en alguno de ellos, en caso sea requerido. Como, por ejemplo, modificar el porcentaje de importancia relativa de cada capa para realizar la superposición ponderada.

La automatización se realizó con la herramienta ModelBuilder, que permite la automatización de los procesos mediante “programación visual”, debido a que crea diagramas de flujo cuyos componentes pueden ser editados y procesados para obtener una nueva ruta en función de un criterio o conjunto de criterios que pueden ser modificados.

ModelBuilder permitió la ejecución paso a paso de cada proceso, que fueron los mismos que los explicados en el caso del modelo no automatizado. Por lo tanto, se previó obtener el mismo resultado, siendo los procesos a seguir: conversión de capas a formato ráster, reclasificación de las capas, superposición ponderada de las capas, obtención del coste de distancia y obtención de la ruta de coste.

3.1.2. Trazo preliminar de la carretera aplicando el método de la línea de gradiente en Civil3D

De acuerdo con Cárdenas Grisales (2015), la línea de gradiente es un trazo preliminar que sigue una pendiente constante y pasa por los puntos de control, uniendo los puntos de inicio fin de un proyecto de carretera. Este trazo permite para elaborar el diseño geométrico de la vía,

minimizando el movimiento de tierras (corte y relleno), respetando las normas del Manual de Carreteras: Diseño Geométrico DG-2018.

En la presente tesis se realizaron 3 propuestas de trazo preliminar mediante el método de la línea de gradiente. Para la primera propuesta, se extrajo el mapa de curvas de nivel de la zona de estudio, y se realizó el método de la línea de gradiente. Para las siguientes dos propuestas, se superpuso la capa de la ciudad de Abancay sobre el mapa de curvas de nivel, y se realizó el método. Ello con el objetivo de evitar su cruce por la capa de la ciudad, debido a que la naturaleza del proyecto consiste en una vía de evitamiento, es decir, una vía que evite su paso por la zona urbana de la ciudad.

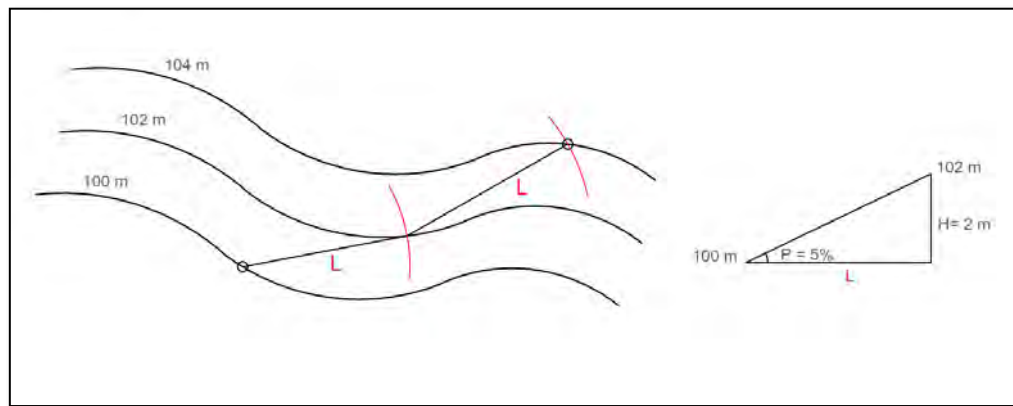
Se tuvieron en cuenta las siguientes consideraciones para la elaboración de las tres propuestas mediante el método de la línea de gradiente: un radio de círculo $L = 40$ m, que se obtuvo como el cociente de la equidistancia entre curvas de nivel ($H = 2$ m) por la pendiente constante ($P = 5\%$).

Se consideró una pendiente constante $P = 5\%$ para el trazo de la línea de gradiente, debido a que inicialmente no se conoce la orografía del terreno y se decidió escoger una pendiente media entre 0% (pendiente mínima) y 10% (pendiente máxima), valores escogidos en función al Manual de Carreteras Diseño Geométrico DG-2018.

Como se observa en la Figura 5, una vez hallado el valor del radio (L), se procedió a trazar un círculo desde el punto de partida, el cual intersecó la curva de nivel contigua. Dichos puntos, el de inicio e intersección se unieron con un trazo, y luego se repitió el mismo procedimiento para la siguiente curva, considerando la intersección generada como nuevo centro del círculo, hasta llegar al punto final o de destino.

$$L = \frac{H (m)}{P (\%)} = \frac{2 m}{5\%} = 40 m$$

Figura 5
Radio de círculo L para el trazo de la línea gradiente



Nota. El gráfico representa el procedimiento realizado durante la aplicación del método de la línea de gradiente. Elaboración propia.

Cabe mencionar que, al tratarse de un proyecto de carretera, se consideraron equidistancias de 2 m entre las curvas de nivel. Luego, se unieron todas las intersecciones, partiendo desde el tramo inicial de la carretera, llegando al punto de destino. Además, se tuvo en consideración los puntos de paso intermedio por donde se desea que pase o no el trazo de la carretera, por ejemplo, la ciudad de Abancay.

Finalmente, se presentaron las tres propuestas obtenidas mediante el método de la línea de gradiente, las cuales fueron nombradas como Línea de Gradiente, Línea de Gradiente Op.1 y Línea de Gradiente Op.2. Siendo la primera, la propuesta obtenida considerando solamente los puntos de inicio y fin de la vía, además del mapa de curvas de nivel. Y en las dos últimas propuestas, se consideró, además de lo mencionado anteriormente, la superposición de la capa de la ciudad de Abancay sobre el mapa de curvas de nivel.

3.2.Comparación de Propuestas

3.2.1. Proceso de análisis jerárquico (método AHP)

De las cuatro rutas propuestas en el trabajo de tesis (*Ruta Propuesta AMC, Línea de Gradiente, Línea de Gradiente Op.1 y Línea de Gradiente Op.2*), se realizó un proceso de análisis jerárquico de solo tres de ellas, descartando la propuesta denominada *Línea de*

Gradiente, debido a que la naturaleza del proyecto es una vía de evitamiento, es decir, evita pasar por dentro del casco urbano de la ciudad de Abancay, condición que dicho trazo no cumple.

Las comparaciones entre las tres alternativas, fueron llevadas a cabo en el software Expert Choice, desarrollado para la toma de decisiones colaborativas, bajo la teoría del método AHP. Razón por la cual, se definieron los objetivos, los criterios y subcriterios, y las alternativas evaluadas.

Para la comparación de los trazos preliminares, se consideraron once criterios, los mismos que fueron tomados en cuenta durante el desarrollo de la *Ruta Propuesta AMC* y dos adicionales que fueron considerados para la evaluación de las alternativas. Los criterios fueron representados por capas en formato ráster, reclasificadas en ArcMap, sobre las cuales se superpusieron las rutas: *Ruta Propuesta AMC*, *Línea de Gradiente Op.1* y *Línea de Gradiente Op.2*. Ello con el objetivo de realizar una comparación visual entre las alternativas y determinar los valores apropiados para completar las matrices de comparación, correspondientes al método AHP en el software Expert Choice 11. Por otra parte, los dos criterios adicionales fueron determinados por medio de cálculo y no estuvieron representados por capas, por lo tanto, la comparación fue numérica en estos casos.

Luego de completar las matrices de comparación para los diferentes criterios, se evaluaron los resultados en función a los gráficos de análisis de sensibilidad del software. Estos fueron los gráficos de Sensibilidad Dinámica y Sensibilidad de Rendimiento, que permitieron interpretar cuál fue la mejor opción entre las alternativas propuestas.

3.2.2. Comparación a juicio de expertos

Para la comparación a juicio de expertos, se realizó una breve entrevista con cuatro ingenieros civiles, en la cual se abordó los temas tratados en el presente trabajo de tesis. Luego,

se les entregaron los planos referidos en el Anexo N° 14. y el Anexo N° 15, para que puedan ser evaluados en base a la teoría impartida en la reunión, y en base a la experiencia de cada uno de los especialistas.

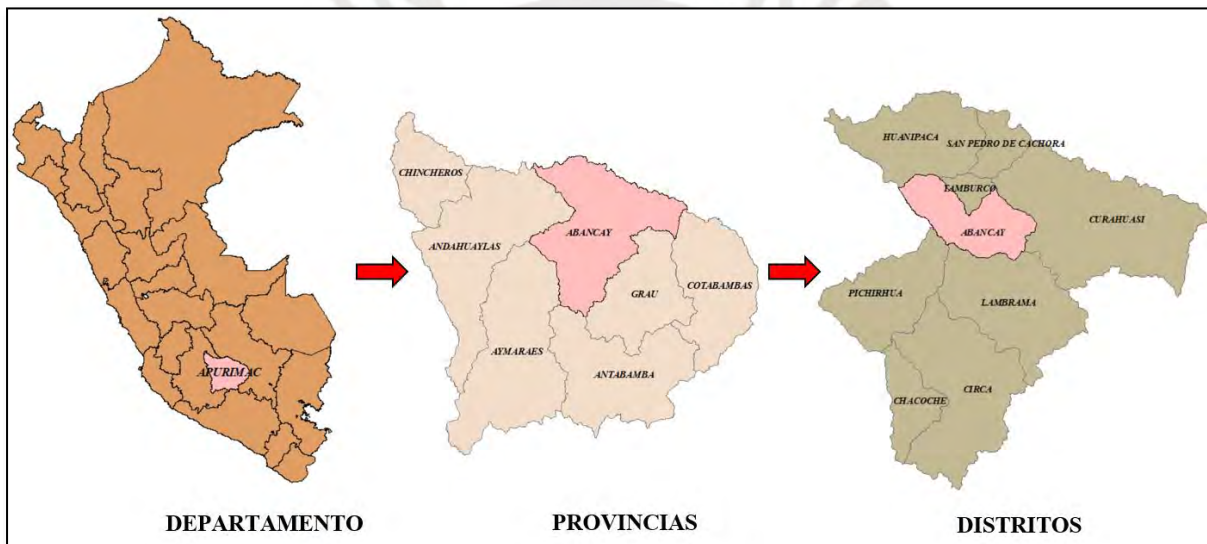
Con la información proporcionada, cada ingeniero expresó sus comentarios y retroalimentación, con respecto a la teoría propuesta y los trazos evaluados. La retroalimentación fue recibida mediante carta de cada especialista y fue evaluada por los tesisistas para la elaboración de las conclusiones y recomendaciones del trabajo de tesis.



Capítulo IV: Aplicación al Caso de Estudio “Vía de Evitamiento de Abancay”

Abancay es una ciudad, capital de la provincia que lleva el mismo nombre, perteneciente al departamento de Apurímac, ubicada al sureste del Perú. Se encuentra a 2377 ms.n.m y de acuerdo al último censo nacional, posee una población 69 mil 028 habitantes (Instituto Nacional de Estadística e Informática, 2018). Se encuentra compuesta por 9 distritos, que son Abancay, Tamburco, Chacoche, Cachora, Curahuasi, Lambrama, Huanipaca, Pichirhua y Circa (Municipalidad Provincial de Abancay, s.f.).

Figura 6
Departamento, provincia y ciudad de Abancay



Nota. El gráfico muestra, sombreado de rojo, el distrito de Abancay, donde se encuentra el área de la zona de estudio. Elaboración propia.

Como se encuentra situada en los andes centrales, se caracteriza por tener un territorio accidentado, de valles profundos y agrestes cumbres, que alternan con altas mesetas o punas y picos nevados, como por ejemplo el nevado de Ampay, con una altitud máxima de 5223 msnm (Instituto Nacional de Estadística e Informática, 1996). Además, posee un clima de tipo semiseco, templado y húmedo durante todo el año, con una temperatura máxima entre 21°C a 25°C, y una temperatura mínima entre 7°C a 11°C, con una precipitación anual acumulada entre

700 mm a 2000 mm aproximadamente (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú, s.f.).

La ciudad de Abancay es un importante punto de actividad comercial donde se acopian productos con el fin de ser transportados a los diferentes mercados de la región. Su población es mayormente rural y sus actividades principales son la crianza de ganado. Con respecto a la agricultura, se cultiva maíz amiláceo, mashua, papa, cebada, entre otros; siendo los de principal exportación la caña de azúcar y el café. Además, la explotación del cobre de Las Bambas y del hierro de Andahuaylas y Aymaraes, representa una esperanza para la economía local. Abancay cuenta con una central hidroeléctrica que lleva el mismo nombre, el cual emplea las aguas del río Pachachaca, y con otra central hidroeléctrica llamada Poma cocha, que usa las aguas del río Pampas (VERA & MORENO S.A., 2016).

Figura 7

Foto panorámica de la ciudad de Abancay



Nota. La figura muestra una foto panorámica de la ciudad de Abancay, rodeada por un territorio accidentado, de valles profundos. Elaboración propia.

En la actualidad (2016) los vehículos livianos y pesados que se dirigen a ciudades colindantes a Abancay tienen que pasar por las principales calles de la ciudad, debido a la

carencia de una vía que evite pasar por el centro de la misma, causando congestionamientos que derivan en altos costos de operatividad vehicular y constantes accidentes de tránsito que terminan en pérdidas materiales o de vidas humanas. Por tal motivo, se vuelve necesario la construcción de una vía de evitamiento, denominada “Vía de Evitamiento de Abancay”, cuyo fin es evitar pasar por el centro de la ciudad y descongestionar las principales vías de los vehículos pesados y de aquellos cuyo fin es realizar viajes de larga distancia. De esa forma se busca evitar los altos costos de operatividad vehicular y también las pérdidas materiales y de vidas humanas (VERA & MORENO S.A., 2016)

4.1.Método de Análisis Multicriterio Aplicado en ArcGIS para Determinar el Trazo Preliminar de la Vía de Evitamiento de la Ciudad de Abancay

4.1.1. Preparación de capas

4.1.1.1. Selección y obtención de capas

Para identificar las capas de interés, participantes en el modelo, se tomaron en cuenta proyectos de investigación similares, en los que se consideró el análisis multicriterio para determinar la selección del trazo o ruta preliminar de una carretera. Además, se consideraron algunos de los requerimientos de las normas técnicas peruanas vigentes y también estudios pertenecientes al expediente técnico del caso de estudio Vía de Evitamiento de la Ciudad de Abancay.

Con respecto a los trabajos de investigación, se tomaron como referencia los siguientes criterios:

- **Aplicación de métodos de decisión multicriterio discretos al análisis de alternativas en estudios informativos de infraestructuras de transporte (Medina & García, 2016).**

Tabla 2

Criterios a incluir en el análisis de alternativas de infraestructuras de transportes

Criterios	Subcriterios
Funcionales	Captación de tráfico
	Integración con red actual
	Intermodalidad
	Longitud de recorrido
	Trazado en planta
	Trazado en alzado
	Tiempo de recorrido
Técnicos	Geotecnia
	Accesos
	Estructuras
Medioambientales	Integración paisajística
	Necesidad de préstamos y vertederos
	Residuos
	Ruidos y vibraciones
	Protección fauna
	Espacios protegidos
Sociales	Mejora de la seguridad
	Desarrollo económico y social de la región
Económicos	Coste construcción
	Coste explotación

Nota. Adaptado de “Aplicación de métodos de decisión multicriterio discretos al análisis de alternativas en estudios informativos de infraestructuras de transporte”, por Medina y García, 2016.

- *GIS Platform for multicriteria evaluation of route alignments.* (En español: Plataforma GIS para la evaluación multicriterio de alineaciones de ruta) (Sadek, Bedran, & Kaysi, 1999).

Tabla 3

Criterios para la evaluación de tres rutas de carretera

Criterios	Subcriterios
Costos de Ingeniería	Pendiente
	Tipo de roca
	Fallas
Costo Ambiental	Cobertura del suelo
	Restos arqueológicos
	Áreas protegidas

Nota. Adaptado de *Designing and evaluation of three alternatives highway routes using the analytical hierarchy process and the least-cost path analysis, application in Sinai Peninsula, Egypt*, por Effat y Hassan, 2013.

Con respecto al Manual de Carreteras: Diseño Geométrico DG-2018, se tomaron en cuenta algunos de los criterios mencionados en la Sección 201 “Estudios preliminares para efectuar el diseño geométrico”.

- Geodesia y topografía básica
- Hidrología, hidráulica y drenaje
- Geología y geotecnia
- Aspectos ambientales
- Protección de restos arqueológicos

Con respecto al “Estudio Definitivo para la Construcción de la Vía de Evitamiento de la Ciudad de Abancay”, perteneciente al Expediente Técnico, se tomaron en consideración los siguientes criterios:

- Mitigación del impacto ambiental
- Estudios de ingeniería básica: tráfico y seguridad vial, trazo y topografía, suelos, hidrología e hidráulica, geología y geotecnia, entre otros.
- Manejo socio – ambiental
- Plan de consultas públicas

Por otra parte, de acuerdo con el libro Diseño Geométrico de Carreteras (2015), de Cárdenas Grisales, para la realización del trazado de ruta se debe tener en cuenta los puntos de control primarios y secundarios, es decir, inicio y fin de la carretera, además de los puntos por donde se haga necesario su paso. Ello debido a razones técnicas, económicas, sociales y políticas. Además, para su selección considera necesario el acopio de los siguientes datos: topografía, geología, hidrología, drenaje, usos de la tierra, y actividad económica y social de la zona.

Luego de tomar diferentes referencias para determinar los criterios a considerar en el modelo del caso de estudio, y con la asesoría de expertos, entre ellos la ingeniera especialista en SIG Olga Pérez Moncada y del magíster en ingeniería civil Fernando José Campos De la

Cruz, se optó por considerar criterios en función a los aspectos técnicos, sociales y ambientales, de ahora en adelante denominados Criterios Primarios. Estos fueron delimitados en una sola área de estudio, y divididos en Criterios Secundarios, los cuales a su vez se subdividieron en Criterios Terciarios, estos representan las capas a utilizar dentro del modelo de aplicación del caso de estudio propuesto.

A continuación, se muestra la selección de los Criterios Primarios, Secundarios y Terciarios.

Tabla 4
Criterios considerados para la obtención del trazo de ruta preliminar propuesto

Criterios Primarios	Criterios Secundarios	Criterios Terciarios
Aspecto Técnicos	Geología	Sub-Unidades Geomorfológicas
		Pendientes
		Peligros Geológicos
Aspectos Sociales	Puntos de Control	Centro Poblado
		Comunidades Campesinas
		Predios Rurales
Aspectos Ambientales	Ecosistemas	Cobertura Vegetal
		Área Natural Protegida
		Zona de Amortiguamiento

Nota. Se observan los criterios y subcriterios, que fueron seleccionados en colaboración con los expertos, en base al criterio ingenieril y a la bibliografía recopilada. Elaboración propia.

Además de las capas participantes seleccionadas, también se deben considerar los puntos de inicio y fin del tramo de la vía de evitamiento. Por lo tanto, se concluye que las capas, cuya información georreferenciada deben ser halladas en los diversos geovisores disponibles y de fuentes confiables, son la siguientes.

Tabla 5
Capas participantes en el modelamiento de la ruta preliminar propuesta con el aplicativo ArcMap

Capas Participantes
Punto de Inicio
Punto Final
Sub-Unidades Geomorfológicas
Pendientes

Peligros Geológicos
Centro Poblado
Comunidades Campesinas
Predios Rurales
Cobertura Vegetal
Área Natural Protegida
Zona de Amortiguamiento

Nota. Se observan las capas participantes en el modelo propuesto en el trabajo de tesis. Elaboración propia.

A continuación, se define cada una de las capas que son participes en el modelo propuesto.

- Punto de Inicio: Describe el lugar de partida de la ruta y es considerado el punto donde oficialmente comienza la vía.
- Punto Final: Describe el lugar de destino de la ruta y es considerado el punto donde oficialmente termina la vía.
- Sub-Unidades Geomorfológicas: Las subunidades geomorfológicas son componentes distintos que pueden ser identificados y examinados en diversas escalas utilizando métodos establecidos. La categorización de las formas geológicas se fundamenta en los procesos de origen que las generaron, y a su vez, estos procesos se definen en función de un agente natural (como ríos, glaciares, viento, etc.) o un contexto climático específico (Bocco et al., 2001, como se citó en Medina et al., 2014). De acuerdo con Medina et al. (2014), con el objetivo de reconocer las causas y los efectos de los elementos que influyen en la configuración del relieve, es esencial llevar a cabo una descripción detallada del paisaje, que involucre el análisis de los efectos de los factores que afectan el relieve (como la morfología, morfogénesis y morfoevolución) en el área de evaluación.
- Pendientes: Se define como la relación entre la diferencia de cotas en un determinado tramo o longitud recorrida.
- Peligros Geológicos: Los riesgos geológicos son procesos o fenómenos de origen geológico que representan amenazas para la vida, la salud y los bienes. Pueden causar daños a la propiedad, pérdida de medios de subsistencia y servicios, trastornos sociales y económicos, así como daños materiales. Estos peligros pueden surgir tanto internamente (endógenos) como en la superficie de la Tierra (exógenos). Dentro de los endógenos se incluyen los terremotos, tsunamis, actividad y emisiones volcánicas. En el grupo de los exógenos se encuentran movimientos en masa, como deslizamientos, avalanchas, desprendimientos de rocas, derrumbes, aluviones, huacos, flujos de lodo,

hundimientos, así como la erosión e inundaciones (Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico, 2021).

- Centro Poblado (urbano): Se considera centro poblado urbano a aquel que cuenta con una población de 2 mil habitantes o más. Las viviendas se encuentran agrupadas en forma contigua, formando manzanas y calles. La categoría principal dentro de los centros poblados urbanos es la ciudad, que puede incluir componentes como urbanizaciones, conjuntos habitacionales y pueblos jóvenes. A medida que las ciudades más grandes crecen y se expanden, pueden abarcar otras áreas urbanas, lo que da lugar a la formación de áreas metropolitanas y aglomeraciones urbanas (Instituto Nacional de Estadística e Informática, 2015).
- Comunidades Campesinas: “Organización con personería jurídica integrada por familias con vínculos ancestrales, sociales, económicos y culturales que ocupa determinado territorio y que se sustenta en la propiedad comunal de la tierra, el trabajo comunal y la ayuda mutua” (Real Academia Española, 2023).
- Predios Rurales: Los predios rurales son aquellos que se encuentran fuera de las áreas urbanas, identificadas como tales en los planes de ordenamiento territorial aprobados por el municipio correspondiente (CIP Trujillo, s.f.).
- Cobertura Vegetal: La cobertura vegetal se refiere a la capa de vegetación autóctona que se extiende sobre la superficie de la tierra, abarcando una variedad de biomasa con características fisonómicas y ambientales diversas, que van desde pastizales hasta áreas cubiertas por bosques nativos (Ministerio del Ambiente, 2019).
- Área Natural Protegida: Se define Área Natural Protegida (ANP) como una porción del territorio, tanto marino como terrestre, que ha sido delimitada de manera adecuada y que representa muestras significativas de la biodiversidad. Su objetivo principal es la conservación de estos recursos naturales, así como la preservación de otros valores asociados, como los culturales, paisajísticos y científicos, en armonía con el desarrollo sostenible (Servicio Nacional de Áreas Naturales Protegidas por el Estado, 2013).
- Zona de Amortiguamiento: Las zonas de amortiguamiento son áreas colindantes o contiguas a un área natural protegida. Tiene como objetivo principal reducir el impacto negativo de las actividades humanas dentro del ANP, al tiempo que promueven la conectividad entre el este y su entorno (Servicio Nacional de Áreas Naturales Protegidas por el Estado, 2013).

Luego de haber definido las capas participantes en el modelo, se debe determinar las fuentes a partir de las cuales se obtendrán para que estas puedan ser procesadas en el aplicativo ArcMap del software ArcGIS.

- Punto de Inicio: Obtenida a partir de las coordenadas UTM que se encuentran en el “Estudio definitivo para la construcción de la Vía de Evitamiento de la ciudad de Abancay”, del expediente técnico del caso de estudio.
- Punto Final: Obtenida a partir de las coordenadas UTM que se encuentran en el “Estudio definitivo para la construcción de la Vía de Evitamiento de la ciudad de Abancay”, del expediente técnico del caso de estudio.
- Sub-Unidades Geomorfológicas: Obtenida a partir del visor geográfico del Ministerio del Ambiente (MINAM). <https://geoservidor.minam.gob.pe/>
- Pendientes: Obtenida a partir del visor geográfico del MINAM. https://geoservidorperu.minam.gob.pe/geoservidor/download_raster.aspx
- Peligros Geológicos: Obtenida a partir del visor geográfico del Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (INGEMMET). <https://geocatmin.ingemmet.gob.pe/geocatmin/>
- Centro Poblado: Fuente propia, obtenida a partir de la delimitación del casco urbano de la ciudad de Abancay.
- Comunidades Campesinas: Obtenida a partir del visor geográfico del Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego (MIDAGRI). <https://siea.midagri.gob.pe/portal/>
- Predios Rurales: Obtenida a partir del visor geográfico del MIDAGRI. <https://siea.midagri.gob.pe/portal/>
- Cobertura Vegetal: Obtenida a partir del visor geográfico del MINAM. <https://geoservidor.minam.gob.pe/>
- Área Natural Protegida: Obtenida a partir del visor geográfico del Servicio Nacional de Áreas Naturales Protegidas por el Estado (SERNANP). <https://geo.sernanp.gob.pe/visorsernanp/>

- Zona de Amortiguamiento: Obtenida a partir del visor geográfico del SERNANP. <https://geo.sernanp.gob.pe/visorsernanp/>

En resumen, se tienen las siguientes capas participantes de diferentes geovisores, como se muestra en la tabla 6.

Tabla 6

Capas participantes en el modelo con sus respectivas fuentes

Capas Participantes	Fuente	Fecha del Archivo
Punto de Inicio	Exp. Técnico	2021
Punto Final	Exp. Técnico	2021
Sub-Unidades Geomorfológicas	MINAM	2020
Pendientes	MINAM	2008
Peligros Geológicos	INGEMMET	2015
Centro Poblado	Propia	2021
Comunidades Campesinas	MIDAGRI	2019
Predios Rurales	MIDAGRI	2019
Cobertura Vegetal	MINAM	2020
Área Natural Protegida	SERNANP	2019
Zona de Amortiguamiento	SERNANP	2019

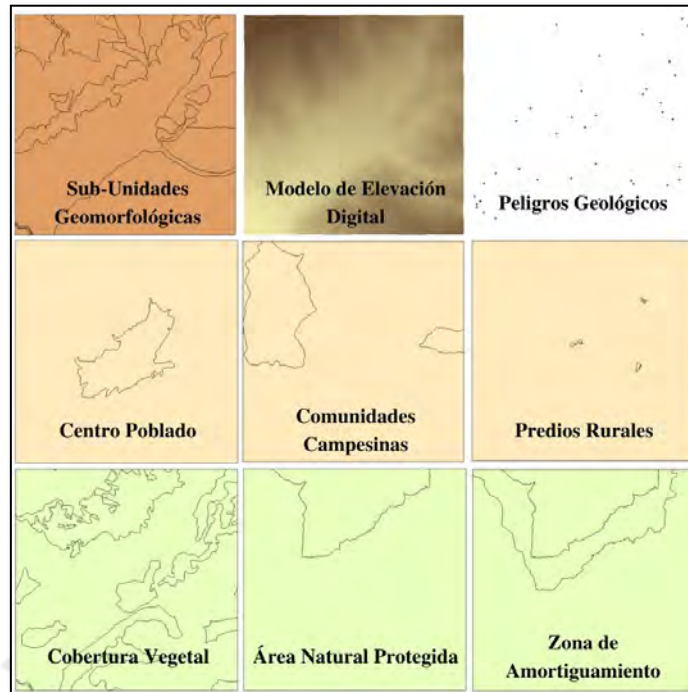
Nota. La tabla muestra las diversas fuentes de donde fueron obtenidas cada una de las capas participantes para el modelo, las cuales poseen datos como la información geográfica georreferenciada correspondiente a cada una de ellas. Elaboración propia.

Las capas participantes fueron delimitadas en ArcMap, en función de los puntos de inicio y fin, los cuales se encuentran sobre la carretera Ruta Nacional 3S. Para ello se descargaron capas auxiliares de la ciudad de Abancay y de las carreteras nacionales. El proceso para delimitar la zona de influencia de la ruta propuesta se muestra en el Anexo N° 1.

Luego de obtener el área o zona de estudio, sobre el cual se realizará el emplazamiento del eje preliminar propuesto, se delimitaron las capas participantes del modelo, obteniéndose las siguientes capas.

Figura 8

Capas participantes en el modelo para obtener el eje preliminar propuesto

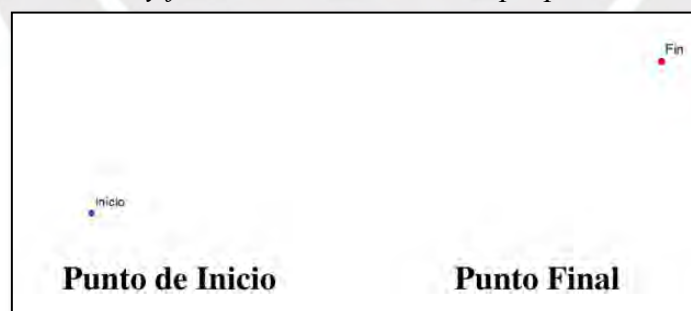


Nota. En la figura se observan las capas participantes en formato shapefile (.shp), a excepción de la capa de pendientes, que inicialmente se obtiene como un modelo de elevación digital (DEM). Elaboración propia.

Adicionalmente, para realizar el modelo en ArcMap, se deben considerar las capas de inicio y fin de la vía.

Figura 9

Capas participantes de inicio y fin de la vía en el modelo propuesto



Nota. En la figura se observan las capas participantes de punto de inicio y fin de la vía, los cuales permiten delimitar la vía en función a estos hitos. Elaboración propia.

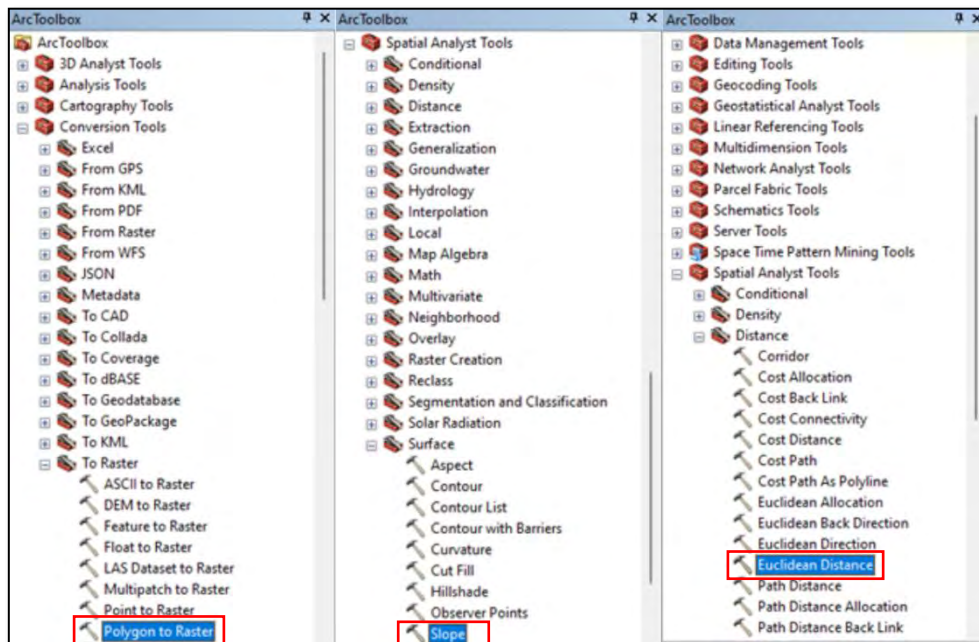
4.1.1.2. Conversión de capas

Para procesar los datos en el modelo, estos se deben encontrar en formato ráster, es decir, con extensión .tif. Por lo tanto, la primera acción, luego de cargar las capas participantes

dentro del aplicativo fue realizar la conversión de cada una al formato ráster. Ello se logró de la siguiente forma.

- Las capas Sub-Unidades Geomorfológicas, Centro Poblado, Comunidades Campesinas, Predios Rurales, Cobertura Vegetal, Área Natural Protegida y Zona de Amortiguamiento son capas que, al encontrarse en un formato vectorial de tipo polígonos, fueron transformadas a formato ráster usando la herramienta *Polygon to Raster*, que se encuentra en la ruta *Arctoolbox > Conversion Tools > To Raster > Polygon to Raster*.
- La capa Pendientes fue obtenida a partir de la capa Modelo de Elevación Digital (DEM), que como su nombre señala, al ser un DEM, fue transformada a un formato ráster de pendientes usando la herramienta *Slope*, que se encuentra en la ruta *Arctoolbox > Spatial Analyst Tools > Surface > Slope*.
- La capa Peligros Geológicos, al encontrarse en un formato vectorial de tipo puntos, fue transformada a formato ráster usando la herramienta *Euclidean Distance*, que se encuentra en la ruta *Arctoolbox > Spatial Analyst Tools > Distance > Euclidean Distance*.

Figura 10
Herramientas de conversión del aplicativo ArcMap



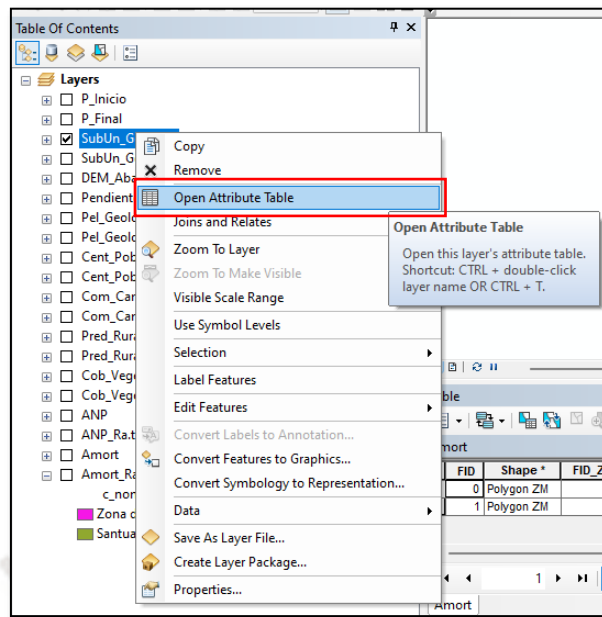
Nota. Herramientas usadas para convertir cada una de las capas a formato ráster. Elaboración propia.

Antes de proceder con la conversión de cada capa, se identificó el campo de interés de cada una, en función a las variables que deben ser parametrizadas de acuerdo a los requerimientos del modelo. Como fue explicado en el capítulo Estado del arte, estas capas poseen diferentes tipos información georreferenciada, por lo tanto, se definió con cuál de estas variables se trabajó cada capa participante en el modelo.

- Para poder identificar las variables que contiene cada capa participante, se hizo uso de la herramienta *Open Attribute Table*.

Figura 11

Herramienta para identificar la tabla de atributos de cada capa participante



Nota. Herramienta usada en cada capa para identificar la información que poseen e identificar las variables (o campos) de interés para la elaboración del modelo propuesto. Elaboración propia.

En la figura 12, se muestra, como ejemplo, la tabla de atributos de la capa Sub-Unidades Geomorfológicas. A partir del cual se identificó que el campo *sub_uni* es de interés para el modelo, debido a que es la que contiene información de los diferentes tipos de subunidades geomorfológicas de interés. Por ejemplo, cauce del río, montaña en roca intrusiva, montaña en roca metamórfica, entre otros.

Figura 12

Tabla de atributos de la capa Sub-Unidades Geomorfológicas en el aplicativo ArcMap

FID	Shape *	OBJECTID	sub_uni	Shape_Leng	Shape_Area
0	Polygon ZM	1	Cauce del río	2235.221052	53681.6809
1	Polygon ZM	2	Montaña en roca intrusiva	24124.890086	7388087.58769
2	Polygon ZM	3	Montaña en roca metamórfica	37820.969756	29920568.1102
3	Polygon ZM	4	Montaña en roca sedimentaria	50669.529789	17527728.0762
4	Polygon ZM	5	Montaña en roca volcano-sedimentaria	32361.335731	7019747.23602
5	Polygon ZM	6	Montaña estructural en roca sedimentaria	21861.178228	7605385.44789
6	Polygon ZM	7	Morrenas	5881.332873	1562127.67365
7	Polygon ZM	8	Terraza aluvial	3307.19692	86933.209123
8	Polygon ZM	9	Vertiente coluvial de detritos	3341.919312	161145.766626
9	Polygon ZM	10	Vertiente glacio-fluvial	1454.515819	58062.369871

Nota. Se observa en la figura diferentes columnas (o campos), de los cuales se optó por trabajar con el campo *sub_uni*, debido al interés en las sub-unidades geomorfológicas para la elaboración del modelo. Elaboración propia.

Finalmente, se seleccionaron los siguientes campos de cada una de las capas participantes. Cabe resaltar que en el Anexo N° 2. se encuentra el detalle de la tabla de atributos de cada capa participante en la elaboración del modelo.

Tabla 7

Campos seleccionados en cada una de las capas participantes

Capa	Capa en ArcMap	Campo
Sub-Unidades Geomorfológicas	SubUn_Geomorf	Sub_uni
Pendientes	DEM_Abancay	-
Peligros Geológicos	Pel_Geologico	-
Centro Poblado	Cent_Poblado	Descripcio
Comunidades Campesinas	Com_Campesinas	nom_comuni
Predios Rurales	Pred_Rurales	Descripcio
Cobertura Vegetal	Cob_Vegetal	CobVeg2013
Área Natural Protegida	ANP	anp_cate
Zona de Amortiguamiento	Amort	c_nomb

Nota. La tabla muestra las capas participantes en el modelo, sus nombres abreviados (Capa en ArcMap) para su uso en ArcMap, y finalmente el campo que interesa en cada una de ellas. Elaboración propia.

Luego de haber identificado y definido los campos de interés, se procedió a convertir cada una de las capas a formato ráster con el uso de las herramientas *Polygon to Raster*, *Slope* y *Euclidean Distance*. Las cuales fueron configuradas como se muestra en el Anexo N° 3.

En la figura 13, se muestra el resultado de la conversión de cada capa participante a formato ráster en función al campo de interés definido y seleccionado previamente. Por otra parte, en el Anexo N° 3 se detalla la configuración de las herramientas de conversión de cada capa participante a formato ráster.

Figura 13

Capas participantes convertidas a formato ráster



Nota. La figura muestra cada capa participante convertida a formato ráster, en las cuales se tuvo en consideración el campo de interés de cada una de ellas para el desarrollo del modelo propuesto. Elaboración propia.

4.1.1.3.Reclasificación de capas

Luego de transformar las capas participantes a formato ráster, en función al campo de interés seleccionado para cada una de ellas, se procedió a reclasificar la información que contiene cada campo, de acuerdo a las necesidades del proyecto. La reclasificación se basó en normativas técnicas vigentes, requerimientos del caso de estudio y el criterio ingenieril propio. Ello con el objetivo de ordenar y priorizar la información que poseen las capas.

La reclasificación de los datos fue llevada a cabo mediante una escala numérica de 1 al 9, adaptando la escala de comparación de Saaty, de acuerdo a la interpretación de valores numéricos de la herramienta de reclasificación de ArcMap. Esta reconoce que a los datos a los que se le asigna valores próximos a la unidad son prioritarios y preferentes, es decir, mientras el valor numérico se encuentre alejado de la unidad (mayor que 1), será menos preferente.

Las capas fueron reclasificadas de la siguiente forma:

- **Sub-Unidades Geomorfológicas:**

La capa Sub-Unidades Geomorfológicas se reclasificó en función a los datos que contiene en el campo *sub_uni*, los cuales señalan las sub-unidades geomorfológicas que poseen determinadas áreas dentro de la zona de estudio. Estos datos son los que se muestran en la tabla 8.

Tabla 8

Componentes (datos) que conforman el campo sub_uni

Campo: sub_uni
Cauce del río
Montaña en roca intrusiva
Montaña en roca metamórfica
Montaña en roca sedimentaria
Montaña en roca volcano-sedimentaria
Montaña estructural en roca sedimentaria
Morrenas
Terraza aluvial
Vertiente coluvial de detritos
Vertiente glacio-fluvial
Vertiente o piedemonte aluvio-torrencial
Vertiente o piedemonte coluvio-deluvial

Nota. La tabla muestra los datos de interés en la capa Sub-Unidades Geomorfológicas, los cuales fueron reclasificados en función de su importancia relativa. Elaboración propia.

A partir de los datos que posee este campo, y con la asesoría del ingeniero geólogo Arturo Aguilar, se determinaron los lugares convenientes y no convenientes por donde debería pasar el trazo del eje propuesto.

- **Cauce del río:** Por lo general, no es recomendable trazar el eje de una carretera directamente sobre el cauce del río debido a la posibilidad de inundaciones, erosión y cambios en el curso del agua. En cambio, se suelen buscar áreas adyacentes más estables para el trazado de la carretera.
- **Montaña en roca intrusiva:** La roca intrusiva suele ser sólida y resistente, lo que puede facilitar la construcción de una carretera. Sin embargo, la topografía

montañosa puede requerir excavaciones y terraplenes significativos, lo que podría aumentar los costos y la complejidad de la construcción.

- **Montaña en roca metamórfica:** Al igual que en el caso anterior, se debe tener en cuenta la estabilidad de la roca metamórfica. Se podrían considerar las laderas de la montaña, siempre evaluando la posibilidad de deslizamientos o desprendimientos.
- **Montaña en roca sedimentaria:** Las áreas de montañas en roca sedimentaria pueden presentar mayor estabilidad en comparación con las rocas intrusivas o metamórficas. Las laderas de estas montañas podrían ser opciones adecuadas para el trazo de una carretera, siempre que se realicen estudios geotécnicos para evaluar la estabilidad de las laderas.
- **Montaña en roca volcano-sedimentaria:** Al igual que en el caso de las montañas en roca sedimentaria, las laderas podrían ser opciones viables para trazar una carretera, siempre y cuando se realicen evaluaciones geotécnicas y se consideren los posibles riesgos volcánicos.
- **Montaña estructural en roca sedimentaria:** Estas montañas se forman por procesos tectónicos y suelen tener una morfología más estable. Por lo tanto, pueden ser más adecuadas para el trazado de carretera, siempre y cuando se realice estudios geotécnicos para garantizar la estabilidad del terreno.
- **Morrenas:** Suelen ser terrenos irregulares y poco estables debido a la acumulación de materiales glaciares. No suelen ser adecuadas para el trazado directo de carreteras, pero se pueden tomar en consideración para evitar zonas de mayor riesgo y buscar rutas alternativas.
- **Terraza aluvial:** Suelen ser áreas planas y elevadas cerca de los ríos, lo que las hace potencialmente adecuadas para el trazo de carretera. Sin embargo, es

importante la estabilidad del terreno y considerar posibles inundaciones, antes de realizar el trazado definitivo.

- **Vertiente coluvial de detritos:** Suelen ser inestables debido a la acumulación de materiales sueltos y la acción de la gravedad. Estas áreas pueden requerir medidas de estabilización costosas para permitir el trazado de una carretera.
- **Vertiente glacio-fluvial:** Al igual que en el caso de las terrazas aluviales, las vertientes glacio-fluviales pueden ser opciones favorables para el trazo de una carretera, ya que suelen estar compuestas por sedimentos consolidados y presentar pendientes suaves.
- **Vertiente o piedemonte aluvio-torrencial:** Suelen ser áreas con pendientes pronunciadas u susceptibles a la erosión. El trazado de una carretera en estas áreas, puede ser desafiante debido a la inestabilidad del terreno y la posibilidad de eventos de flujo de lodo o inundaciones repentinas.
- **Vertiente o piedemonte coluvio-deluvial:** Pueden tener pendientes más moderadas y están formadas por la acumulación de detritos. Estas áreas son propensas a movimientos de masa y deslizamientos. No se recomienda trazar el eje de una carretera en estas vertientes.

Como resultado, en la tabla 9, se muestra la reclasificación los datos del campo *sub_uni*.

Tabla 9

Reclasificación del campo sub_uni, de la capa Sub-Unidades Geomorfológicas

Reclasificación de Sub-Unidades Geomorfológicas	
Campo: sub_uni	Nuevos Valores
Cauce del río	9
Montaña en roca intrusiva	9
Montaña en roca metamórfica	9
Montaña en roca sedimentaria	1
Montaña en roca volcano-sedimentaria	1
Montaña estructural en roca sedimentaria	1
Morrenas	9

Terraza aluvial	1
Vertiente coluvial de detritos	9
Vertiente glacio-fluvial	1
Vertiente o piedemonte aluvio-torrencial	9
Vertiente o piedemonte coluvio-deluvial	9

Nota. La tabla muestra la reclasificación que se dio a los datos pertenecientes al campo *sub_uni*, de la capa Sub-Unidades Geomorfológicas. Elaboración propia.

- **Pendientes:**

La capa Pendientes fue reclasificada en función de la orografía del terreno, relacionada a las pendientes. Por lo tanto, se hizo uso de la Sección 102 Clasificación por Orografía, del Capítulo I Clasificación de las Carreteras, del Manual de Carreteras: Diseño Geométrico DG-2018.

Se consideraron las pendientes longitudinales, debido a que son las más representativas en cuanto a los movimientos de tierra (corte y relleno) que se llevan a cabo durante las posteriores etapas de diseño geométrico y ejecución.

La sección 102, del Manual de Carreteras en mención, señala lo siguiente:

- Terreno plano (tipo 1): Se caracteriza por tener pendientes longitudinales menores al 3%. En este tipo de terreno, se requiere un mínimo movimiento de tierras, lo que facilita el trazado de la carretera sin mayores dificultades.
- Terreno ondulado (tipo 2): Este tipo de terreno presenta pendientes longitudinales entre 3% y 6%. Se requiere un nivel moderado de movimiento de tierras, lo que facilita la opción de utilizar alineaciones rectas junto con curvas de radio amplio. El trazado en este tipo de terreno se realiza sin enfrentar mayores dificultades.

- Terreno accidentado (tipo 3): Las pendientes longitudinales en este tipo de terreno oscilan entre el 6% y el 8%. Aquí se requiere un significativo movimiento de tierras, lo cual genera dificultades en el trazado de la carretera.
- Terreno escarpado (tipo 4): Este tipo de terreno presenta pendientes longitudinales superiores al 8%. Se caracteriza por exigir el máximo movimiento de tierras, lo cual representa grandes dificultades en su trazado.

Como no se determinó una capa de interés en específico, al ser un ráster proveniente de un modelo de elevación digital, se reclasificó la capa en función de sus pendientes. Es decir, mientras menor sea la pendiente, será preferible para el trazo del eje propuesto. En la tabla 10. se muestra la reclasificación de las pendientes.

Tabla 10
Reclasificación de valores de la capa Pendientes

Reclasificación de Pendientes	
Campo: Value	Nuevos Valores
0-3	1
3-6	2
6-8	3
8-148.466965	9

Nota. La tabla muestra la reclasificación que se dio a los valores de la capa Pendientes, en función al tipo de terreno representativo de la zona de estudio. Elaboración propia.

- **Peligros Geológicos:**

La capa Peligros Geológicos posee información sobre los peligros geológicos existentes en la zona de estudio, por ejemplo, derrumbe, deslizamiento rotacional, deslizamiento traslacional, flujo de lodo, flujo de detritos, entre otros. Sin embargo, para fines de la presente tesis, y con la asesoría del ingeniero geólogo Arturo Aguilar, se definió que mientras menos próximo se encuentre el trazo del eje propuesto a cualquiera de estos puntos, será más seguro y conveniente.

Por lo tanto, al no determinar una capa de interés en específico, se reclasificaron los datos en función de la distancia del trazo propuesto a estos puntos, como se observa en la tabla 11.

Tabla 11

Reclasificación de valores de la capa Peligros Geológicos

Reclasificación de Peligros Geológicos	
Campo: Value	Nuevos Valores
0-50	9
50-100	8
100-150	7
150-200	6
200-250	5
250-300	4
300-350	3
350-400	2
400- 3879.065918	1

Nota. La tabla muestra la reclasificación que se dio a los valores de la capa Peligros Geológicos, en función a la distancia de los peligros que estos puntos representan, es decir, mientras más alejados de estos, existe una mayor preferencia. Elaboración propia.

- **Centro Poblado:**

El campo *Descripción* en esta capa, señala el centro poblado urbano de la ciudad de Abancay, delimitando el casco urbano de la misma. Por lo tanto, como el fin del trazo propuesto y la naturaleza del proyecto es una vía de evitamiento, esta debe minimizar su paso por el casco urbano de la ciudad, consecuentemente, se reclasificaron los datos como se muestra en la tabla 12.

Tabla 12

Reclasificación del campo Descripción, de la capa Centro Poblado

Reclasificación de Centro Poblado	
Campo: Descripción	Nuevos Valores
Centros Poblados	9
Otros s if	1

Nota. La tabla muestra la reclasificación que se dio a los datos pertenecientes al campo *Descripción*, de la capa Centro Poblado. Elaboración propia.

- **Comunidades Campesinas:**

Esta capa fue reclasificada en función a los datos que contiene el campo *nom_comuni*, que señala las comunidades campesinas presentes en la zona de estudio. Entonces, para determinar la reclasificación de los datos que contiene, se estimó conveniente que el trazo propuesto evite su paso por estas comunidades. Ello ante posibles conflictos sociales o problemas de saneamiento de terrenos que pueda ocasionar un trazo muy próximo a estas zonas. Por lo tanto, se reclasificaron los datos como se muestra en la tabla 13.

Tabla 13

Reclasificación del campo nom_comuni, de la capa Comunidades Campesinas

Reclasificación de Comunidades Campesinas	
Campo: nom_comuni	Nuevos Valores
ZONA DE ESTUDIO	1
HUAYLLABAMBA	9
ASILLO	9

Nota. La tabla muestra la reclasificación que se dio a los datos pertenecientes al campo *nom_comuni*, de la capa Comunidades Campesinas. Elaboración propia.

- **Predios Rurales:**

De forma parecida a la capa Comunidades Campesinas, la capa Predios Rurales fue reclasificada en función a los datos que contiene el campo *Descripcion*, que señala los predios rurales presentes en el lugar de estudio. Entonces, para determinar la reclasificación de los datos que contiene, se estimó conveniente que el trazo propuesto evite su paso por estas áreas. Ello ante posibles conflictos sociales o problemas de saneamiento de terrenos que pueda ocasionar un trazo muy próximo a estas zonas. Por lo tanto, se reclasificaron los datos como se muestra en la tabla 14.

Tabla 14*Reclasificación del campo Descripcio, de la capa Predios Rurales*

Reclasificación de Predios Rurales	
Campo: Descripcio	Nuevos Valores
Predios rurales	9
Area de estudio	1

Nota. La tabla muestra la reclasificación que se dio a los datos pertenecientes al campo *Descripcio*, de la capa Predios Rurales. Elaboración propia.

- **Cobertura Vegetal:**

La capa Cobertura Vegetal, se reclasificó en función a los datos que contiene en el campo *CobVeg2013*, los cuales señalan los diferentes tipos de cobertura vegetal presentes. Estos datos son los que se muestran en la tabla 15.

Tabla 15*Componentes (datos) que conforman el campo CobVeg2013*

Campo: CobVeg2013
Agricultura costera y andina
Área altoandina con escasa y sin vegetación
Área urbana
Bosque relicto mesoandino de coníferas
Bosque xérico interandino
Matorral arbustivo
Pajonal andino
Plantación Forestal
Río

Nota. La tabla muestra los datos de interés en la capa Cobertura Vegetal, los cuales fueron reclasificados en función de su importancia relativa. Elaboración propia.

A partir de los datos que posee este campo, y con la asesoría de la ingeniera especialista de SERFOR, Olga Pérez, se determinaron los lugares convenientes y no convenientes por donde debería pasar el trazo del eje propuesto.

- **Agricultura costera y andina:** Pueden presentar distintas características dependiendo de la ubicación específica. En general, las áreas agrícolas suelen ser más adecuadas para el trazado de carreteras, debido a la presencia de

terrenos más planos y accesibles. Sin embargo, se debe tener en cuenta la planificación agrícola existente y minimizar el impacto a dichas actividades.

- **Área altoandina con escasa y sin vegetación:** Estas áreas con escasa o sin vegetación suelen tener condiciones geográficas adversas, como terrenos rocosos y empinados. El trazado de una carretera en estas áreas puede ser difícil y costoso debido a la falta de suelo estable y la necesidad de construir en terrenos rocosos.
- **Área urbana:** Generalmente tienen infraestructura vial existente y están diseñadas para la circulación de vehículos, lo que las hace adecuadas para el trazado de carreteras. Pero en el presente caso, al tratarse la naturaleza de la carretera de una vía de evitamiento, se considera el área urbana como inadecuada para su paso.
- **Bosque relicto mesoandino de coníferas:** Suelen tener una alta conservación y protección, por lo que su trazado puede ser problemático debido a la necesidad de preservar estos ecosistemas especiales.
- **Bosque xérico interandino:** Estos bosques adaptados a condiciones secas y áridas pueden presentar desafíos para el trazado de una carretera debido a los escasos de agua y la presencia de vegetación resistente a la sequía. Se debe evaluar cuidadosamente la viabilidad técnica y el impacto ambiental antes de considerar el trazado en estas áreas.
- **Matorral arbustivo:** Puede encontrarse en diversas áreas y su densidad y altura pueden variar. En general, estos terrenos pueden ser más adecuados para el trazado de carreteras, ya que los arbustos suelen ser menos densos y pueden ser removidos o trasplantados con relativa facilidad.

- **Pajonal andino:** Al ser pastizales de altura, pueden ofrecer una topografía más favorable para el trazado de una carretera. Sin embargo, se debe tener en cuenta la conservación del ecosistema y minimizar el impacto en la vegetación natural.
- **Plantación Forestal:** Las plantaciones forestales se establecen para la producción de madera u otros productos forestales, y se pueden considerar áreas adecuadas para el trazado de carreteras, ya que ya han sido modificadas para actividades humanas.
- **Río:** Suelen presentar barreras naturales para el trazado de carreteras debido a la necesidad de puentes o cruces que pueden ser costosos y técnicamente desafiantes. En general, se busca trazar carreteras en áreas cercanas a los ríos y aprovechando los valles y terrenos adyacentes para facilitar la construcción y el acceso.

Como resultado, en la tabla 16, se muestra la reclasificación los datos del campo *CobVeg2013*.

Tabla 16
Reclasificación del campo CobVeg2013, de la capa Cobertura Vegetal

Reclasificación de Cobertura Vegetal	
Campo: CobVeg2013	Nuevos Valores
Agricultura costera y andina	1
Área altoandina con escasa y sin vegetación	9
Área urbana	9
Bosque relictos mesoandino de coníferas	9
Bosque xérico interandino	9
Matorral arbustivo	1
Pajonal andino	1
Plantación Forestal	1
Río	9

Nota. La tabla muestra la reclasificación que se dio a los datos pertenecientes al campo *CobVeg2013*, de la capa Cobertura Vegetal. Elaboración propia.

- **Área Natural Protegida:**

El campo *anp_cate*, en esta capa, señala las áreas naturales protegidas dentro de la zona de estudio. Por lo tanto, el trazo del eje propuesto no debe pasar por esas áreas.

Entonces, se reclasificaron los datos como se muestra en la tabla 17.

Tabla 17

*Reclasificación del campo *anp_cate*, de la capa Área Natural Protegida*

Reclasificación de Área Natural Protegida	
Campo: <i>anp_cate</i>	Nuevos Valores
Zona de Estudio	1
Santuario Nacional	9

Nota. La tabla muestra la reclasificación que se dio a los datos pertenecientes al campo *anp_cate*, de la capa Área Natural Protegida. Elaboración propia.

- **Zona de Amortiguamiento:**

El campo *c_nomb*, en esta capa, señala las áreas consideradas como zona de amortiguamiento dentro del área de estudio. Por lo tanto, el trazo del eje propuesto no debe pasar por esas áreas. Entonces, se reclasificaron los datos como se muestra en la tabla 18.

Tabla 18

*Reclasificación del campo *c_nomb*, de la capa Zona de Amortiguamiento*

Reclasificación de Zona de Amortiguamiento	
Campo: <i>c_nomb</i>	Nuevos Valores
Zona de Estudio	1
Santuario Nacional	9

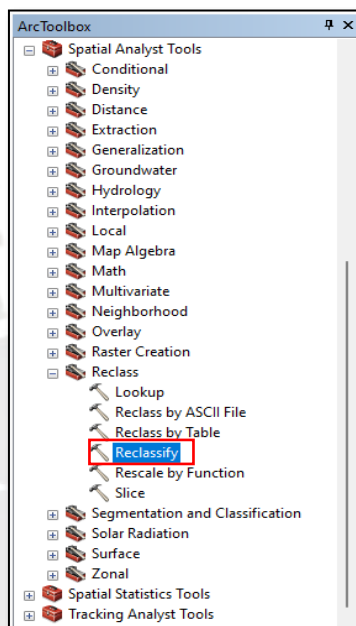
Nota. La tabla muestra la reclasificación que se dio a los datos pertenecientes al campo *c_nomb*, de la capa Zona de Amortiguamiento. Elaboración propia.

Luego de haber definido la reclasificación de cada capa, se reclasificó cada capa en ArcMap de la siguiente forma:

- Para reclasificar la información que contiene el campo de interés en cada capa, se usó la herramienta *Reclassify*, que se encuentra en la ruta *ArcToolbox > Spatial Analyst Tools > Reclass > Reclassify*.

Figura 14

Herramienta de reclasificación del aplicativo ArcMap

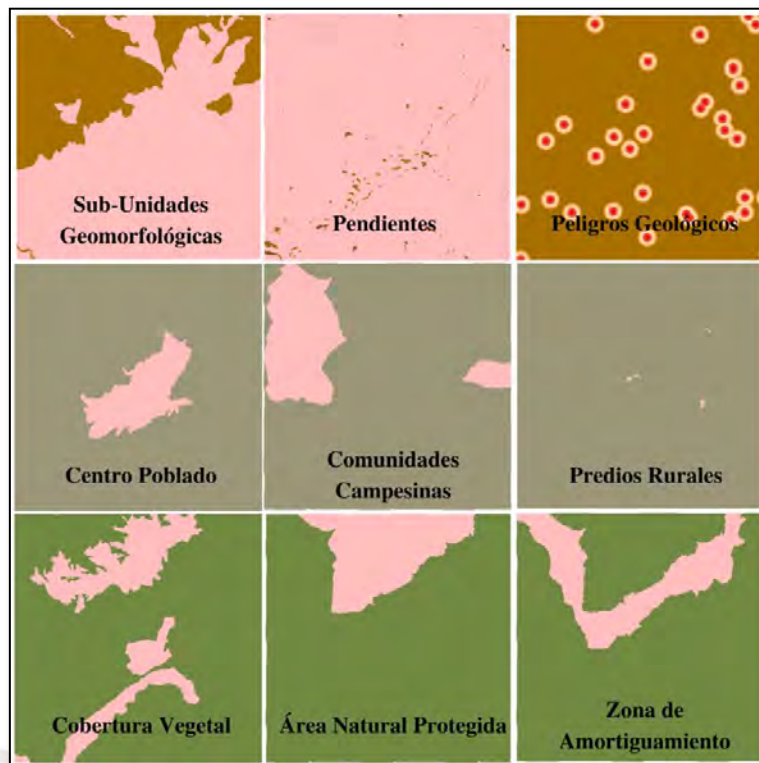


Nota. Herramienta usada para reclasificar la información de interés de cada una de las capas participantes en el modelo. Elaboración propia.

- La herramienta *Reclassify*, se usó para reclasificar la información que contiene el campo de interés en cada capa, razón por la cual se usó nueve veces, es decir, una vez por capa participante. La configuración de esta herramienta se muestra en Anexo N° 4.

En la figura 15, se muestra el resultado de la reclasificación de cada capa participante en función al campo de interés definido y seleccionado previamente. Por otra parte, en el Anexo N° 4, se muestra la configuración de la herramienta *Reclassify* para cada capa participante.

Figura 15
Capas participantes reclasificadas



Nota. La figura muestra las capas participantes reclasificadas, en función al campo de interés de cada una, donde las zonas rojizas señalan las áreas con menor importancia relativa para el paso del trazo preliminar de la ruta. Elaboración propia.

4.1.2. Superposición ponderada de capas

La superposición ponderada de capas se realizó con la finalidad de que los criterios anteriormente establecidos, se conjuguen en una sola capa restrictiva, que respete los parámetros definidos durante la etapa de reclasificación. Para ello, a cada capa participante reclasificada, se le asignó un valor de importancia relativo, de modo que la suma de los valores asignados resulte 1, es decir, 100%. Con el objetivo de determinar áreas eficientes para el emplazamiento del trazo de la ruta preliminar de carretera.

Para la determinación del trazo propuesto mediante el método AMC, se consideraron como capas más importantes o críticas las siguientes: Pendientes, Centro Poblado y Área Natural Protegida. Estas son especialmente relevantes, debido a que se busca reducir al mínimo la necesidad de realizar movimientos de tierra de gran magnitud, disminuir la cantidad de

tráfico dentro del área urbana de la ciudad y evitar cualquier impacto negativo en el ecosistema que forma parte del Área Natural Protegida.

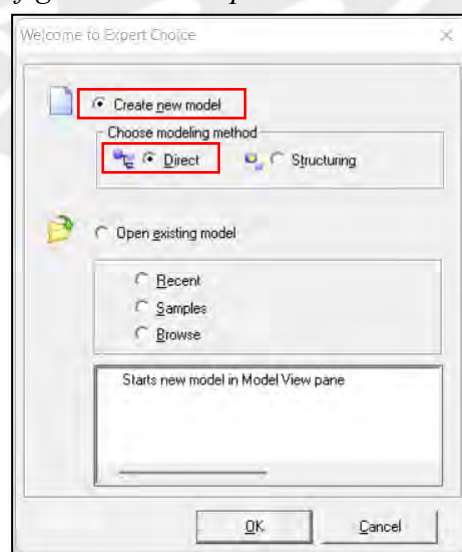
4.1.2.1. Proceso de análisis jerárquico de capas participantes en Expert Choice 11

Con el fin de asignar una importancia relativa a cada capa, se empleó un Proceso de Análisis Jerárquico (AHP) utilizando el software Expert Choice 11. Este programa facilita la toma de decisiones colaborativas al proporcionar una solución basada en el análisis de múltiples criterios.

El objetivo del uso del software es llevar a cabo el método AHP de manera eficiente para evaluar las capas involucradas en el modelo propuesto. A continuación, se describe el proceso realizado en el software para determinar los niveles de importancia relativa de dichas capas.

1. Cuando se abre el programa, por defecto aparece la siguiente ventana de inicio, en la cual se seleccionó la opción de crear un modelo nuevo de forma directa. *Create new model > Direct.*

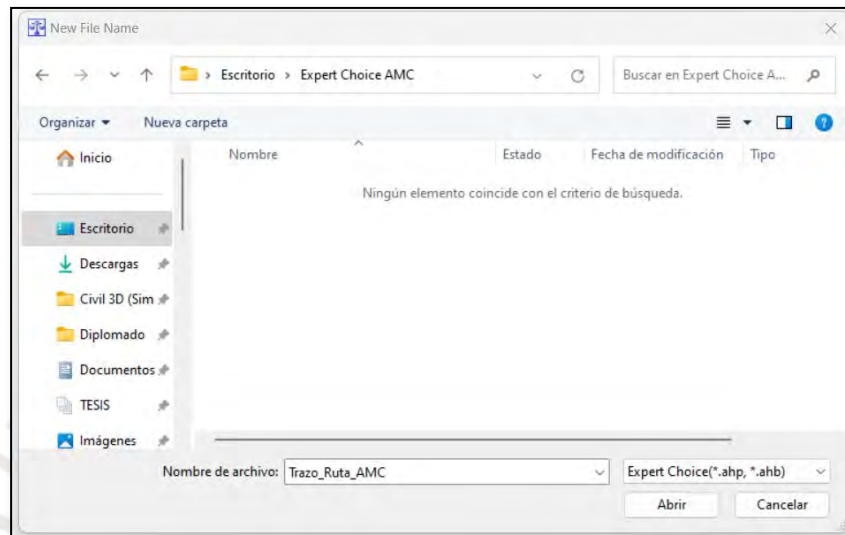
Figura 16
Ventana inicial de configuración de Expert Choice 11



Nota. La figura muestra la selección usada en la ventana de configuración inicial de Expert Choice 11. Elaboración propia.

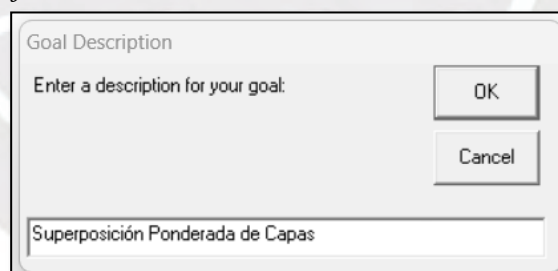
2. Se guardó el modelo en la ruta de salida, bajo el nombre *Trazo_Ruta_AMC*, y luego se estableció, como dato de entrada, la descripción del objetivo, denominándolo *Superposición Ponderada de Capas*.

Figura 17
Ventana de guardado en ruta de salida



Nota. En la figura se observa la ventana de la ruta de salida en la que fue guardado el método AHP realizado. Elaboración propia.

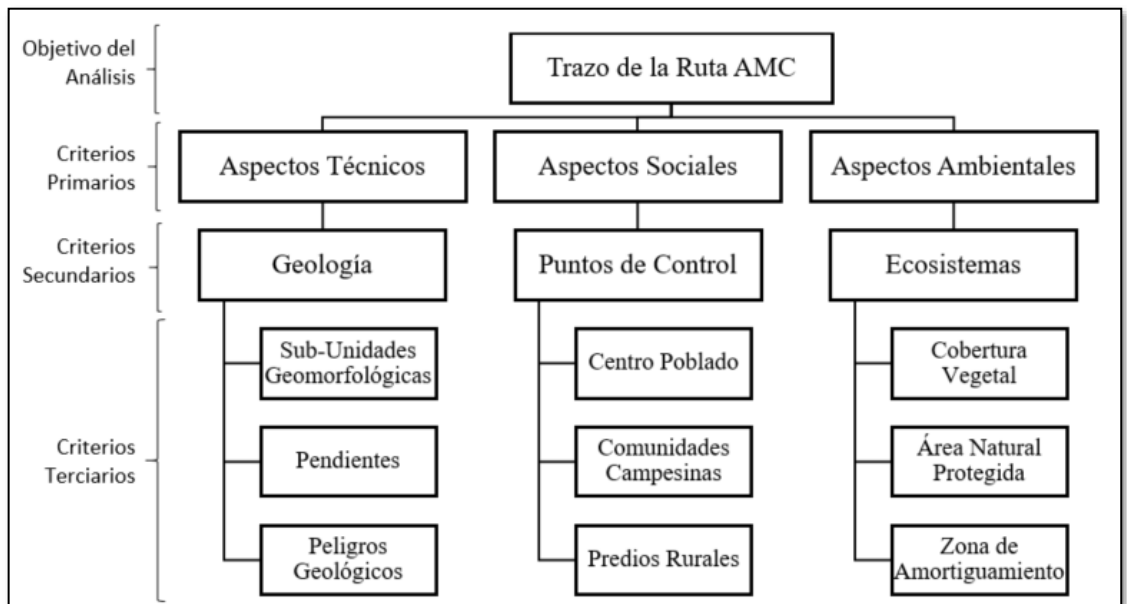
Figura 18
Descripción del objetivo



Nota. En la figura se observa la ventana donde se introduce el objetivo del método AHP llevado a cabo. Elaboración propia.

3. Después de establecer el objetivo del análisis se procedió a determinar la estructura jerárquica en función del objetivo del análisis, criterios y subcriterios (secundarios y terciarios) a ser procesados en el software.

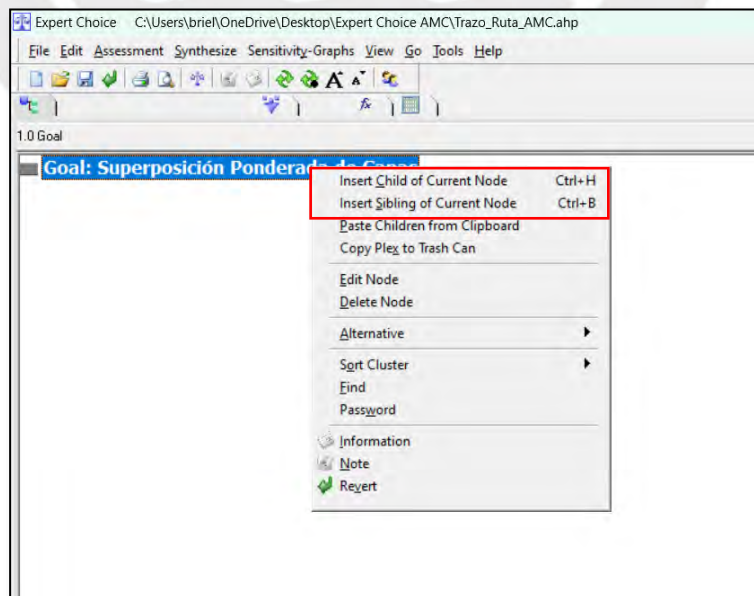
Figura 19
Estructura jerárquica del método AHP del caso de estudio



Nota. En la figura se muestra la estructura jerárquica que se siguió en el método AHP con el software Expert Choice 11, para el presente caso de estudio. Elaboración propia.

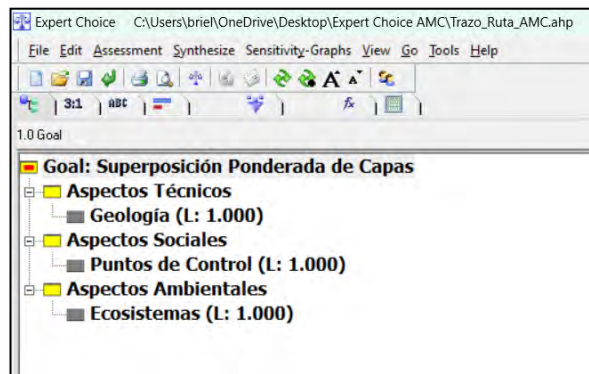
- Se insertaron los nodos (criterios primarios, secundarios y terciarios) en función a la estructura jerárquica definida previamente. Para ello se hizo uso de las funciones *Insert Child of Current Node* e *Insert Sibling of Current Node*.

Figura 20
Inserción de nodos



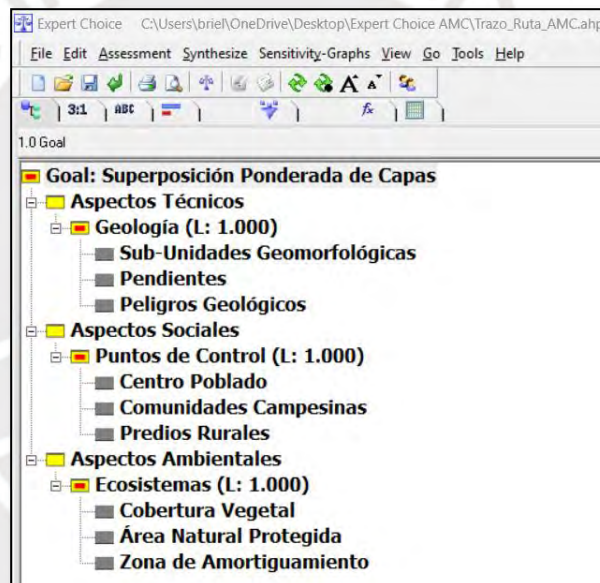
Nota. Se observa que para insertar nodos se debe seleccionar un nodo y luego seleccionar *Insert Child of Current Node* o *Insert Sibling of Current Node*, dependiendo de la estructura jerárquica definida en la figura 19. Elaboración propia.

Figura 21
Nodos de los criterios primarios y secundarios



Nota. Se observan los nodos agregados, correspondientes a los criterios primarios y secundarios. Elaboración propia.

Figura 22
Nodos de los criterios primarios, secundarios y terciarios

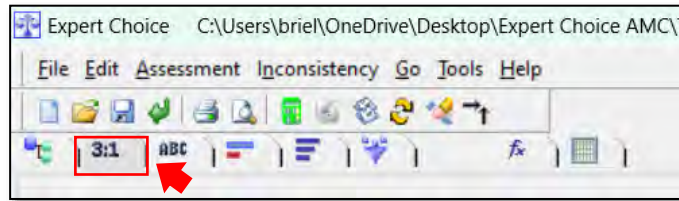


Nota. Se observan los nodos agregados, correspondientes a los criterios primarios, secundarios y terciarios. Elaboración propia.

5. Luego, por medio de la matriz de comparación de criterios, se establecieron valores según la escala de Saaty. Esta configuración se realizó en el apartado *Pairwise Numerical Comparisons*.

Figura 23

Apartado de configuración de la matriz de comparación de criterios



Nota. En la figura se observa la herramienta *Pairwise Numerical Comparisons*, la cual permite configurar la matriz de comparación de criterios. Elaboración propia.

En la matriz de comparación entre criterios primarios, se consideró que los aspectos técnicos, sociales y ambientales, tienen el mismo grado de relevancia para el proyecto. Tal como se observa en la figura 24.

Figura 24

Matriz de comparación entre criterios primarios

	Aspectos Técnicos	Aspectos Sociales	Aspectos Ambientales
Aspectos Técnicos		1.0	1.0
Aspectos Sociales			1.0
Aspectos Ambientales	Incon: 0.00		

Nota. La figura muestra que se le está dando el mismo grado de importancia relativa a cada uno de los criterios primarios. Elaboración propia.

En la matriz de comparación de los criterios terciarios, referidos a Geología, de acuerdo a la escala de Saaty, se consideró lo siguiente: Sub-Unidades Geomorfológicas es ligeramente menos importante que Pendientes e igual de importante que Peligros Geológicos. Además, que Pendientes es ligeramente más importante que Peligros Geológicos.

Figura 25

Matriz de comparación entre criterios terciarios (Geología)

	Sub-Unidades Geomorfológicas	Pendientes	Peligros Geológicos
Sub-Unidades Geomorfológicas		3.0	1.0
Pendientes			3.0
Peligros Geológicos	Incon: 0.00		

Nota. La figura muestra la asignación de valores, en función a la escala de Saaty, a los criterios terciarios referidos a Geología. Elaboración propia.

En la matriz de comparación de los criterios terciarios, referidos a Puntos de Control, de acuerdo a la escala de Saaty, se consideró lo siguiente: Centro Poblado es ligeramente más importante que Comunidades Campesinas y más importante que Predios Rurales. Además, que Comunidades Campesinas es ligeramente más importante que Predios Rurales.

Figura 26

Matriz de comparación entre criterios terciarios (Puntos de Control)

	Centro Poblado	Comunidades Campesinas	Predios Rurales
Centro Poblado			5.0
Comunidades Campesinas			3.0
Predios Rurales	Incon: 0.04		

Nota. La figura muestra la asignación de valores, en función a la escala de Saaty, a los criterios terciarios referidos a Puntos de Control. Elaboración propia.

En la matriz de comparación de los criterios terciarios, referidos a Ecosistemas, de acuerdo a la escala de Saaty, se consideró lo siguiente: Cobertura Vegetal es menos importante que Área Natural Protegida y ligeramente menos importante que Zona de Amortiguamiento. Además, que Área Natural Protegida es ligeramente más importante que Zona de Amortiguamiento.

Figura 27

Matriz de comparación entre criterios terciarios (Ecosistemas)

	Cobertura Vegetal	Área Natural Protegida	Zona de Amortiguamiento
Cobertura Vegetal		5.0	3.0
Área Natural Protegida			3.0
Zona de Amortiguamiento	Incon: 0.04		

Nota. La figura muestra la asignación de valores, en función a la escala de Saaty, a los criterios terciarios referidos a Ecosistemas. Elaboración propia.

Luego de establecer los valores en las matrices de comparación de criterios, se verificó que la relación de consistencia en cada matriz sea menor a 0.1, lo cual indica una adecuada confiabilidad en la asignación de los valores. Caso contrario, se debería asignar nuevos valores razonables a los criterios, en función a la escala de

Saaty. Sin embargo, luego de verificar los valores, se determinó que al ser todos menores a 0.1, estas se encuentran correctamente configuradas.

Figura 28

Verificación de la relación de consistencia en las matrices de comparación

	Aspectos Técnicos	Aspectos Sociales	Aspectos Ambientales
Aspectos Técnicos			1.0
Aspectos Sociales			1.0
Aspectos Ambientales	Incon: 0.00	< 0.1	

	Sub-Unidades Geomorfológicas	Pendientes	Peligros Geológicos
Sub-Unidades Geomorfológicas		3.0	1.0
Pendientes			3.0
Peligros Geológicos	Incon: 0.00	< 0.1	

	Centro Poblado	Comunidades Campesinas	Predios Rurales
Centro Poblado		3.0	5.0
Comunidades Campesinas			3.0
Predios Rurales	Incon: 0.04	< 0.1	

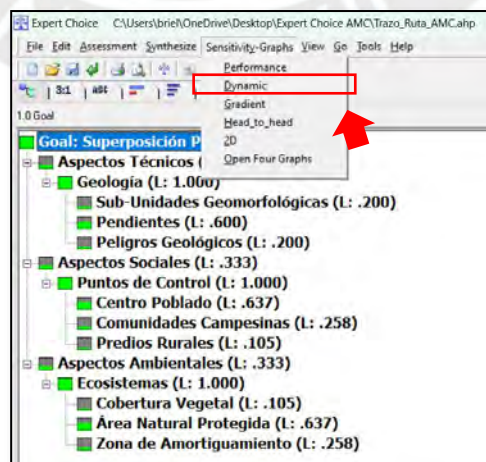
	Cobertura Vegetal	Área Natural Protegida	Zona de Amortiguamiento
Cobertura Vegetal		5.0	3.0
Área Natural Protegida			3.0
Zona de Amortiguamiento	Incon: 0.04	< 0.1	

Nota. En la figura se observa que la relación de consistencia de cada matriz de comparación es menor que 0.1, por lo tanto, se encuentran correctamente configuradas y los valores asignados demuestran confiabilidad. Elaboración propia.

- Finalmente, se procedió a analizar los resultados obtenidos por medio de los gráficos de sensibilidad dinámica obtenidos. Estos gráficos pueden ser observados en el apartado *Sensitive – Graphs > Dynamic*.

Figura 29

Apartado de configuración de los gráficos de sensibilidad dinámica

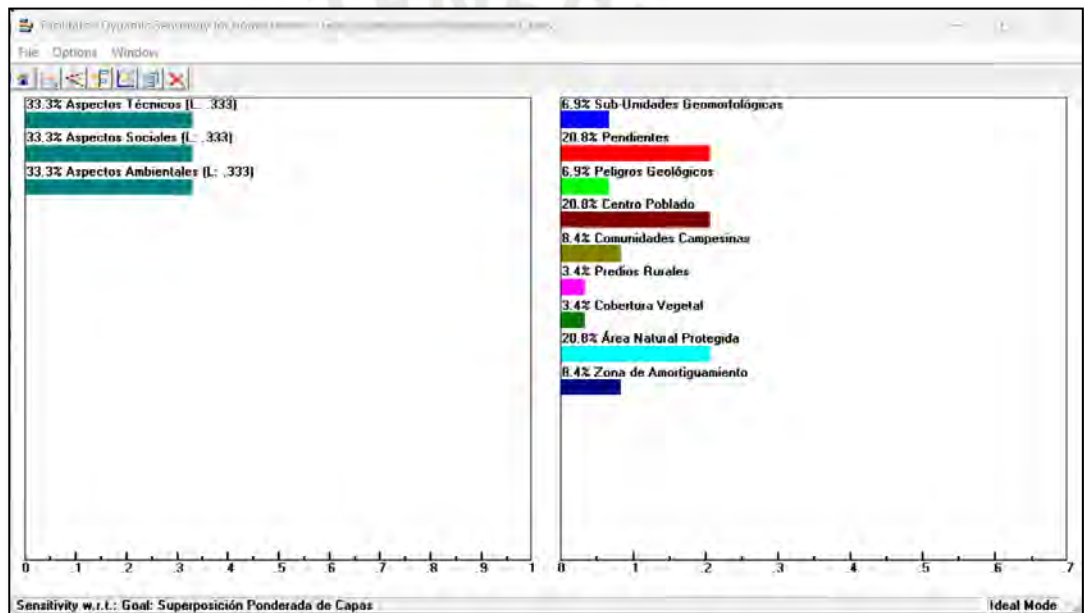


Nota. En la figura se observa la pestaña de configuración para poder visualizar los gráficos de sensibilidad dinámica, obtenidos a partir de las matrices de comparación completadas. Elaboración propia.

Los gráficos dinámicos muestran los porcentajes de participación resultantes de los criterios establecidos inicialmente en la estructura jerárquica. En ella se puede observar que los aspectos técnicos, sociales y ambientales poseen el mismo grado de importancia relativa, tal y como fue definida en su respectiva matriz de comparación. Además, para los criterios terciarios se obtuvieron los valores ponderados que se observan en la tabla 19.

Figura 30

Gráfico de sensibilidad dinámica, resultante del proceso de análisis jerárquico en Expert Choice 11



Nota. Se observa que los criterios primarios poseen el mismo grado de importancia relativa. Además, en el lado derecho de la ventana se observan los valores ponderados de importancia relativa de los criterios terciarios, es decir, de cada capa participante en el modelo propuesto en ArcMap. Elaboración propia.

Tabla 19

Valores ponderados de los criterios terciarios

Criterios Primarios	Criterios Secundarios	Criterios Terciarios	Valores Ponderados
Aspecto Técnico	Geología	Sub-Unidades Geomorfológicas	6.9%
		Pendientes	20.8%
		Peligros Geológicos	6.9%
Aspectos Sociales	Puntos de Control	Centro Poblado	20.8%
		Comunidades Campesinas	8.4%
		Predios Rurales	3.4%

Aspectos Ambientales	Ecosistemas	Cobertura Vegetal	3.4%
		Área Natural Protegida	20.8%
		Zona de Amortiguamiento	8.4%

Nota. La tabla muestra los valores ponderados de importancia relativa de los criterios terciarios, es decir, de cada capa participante en el modelo propuesto en ArcMap. Elaboración propia.

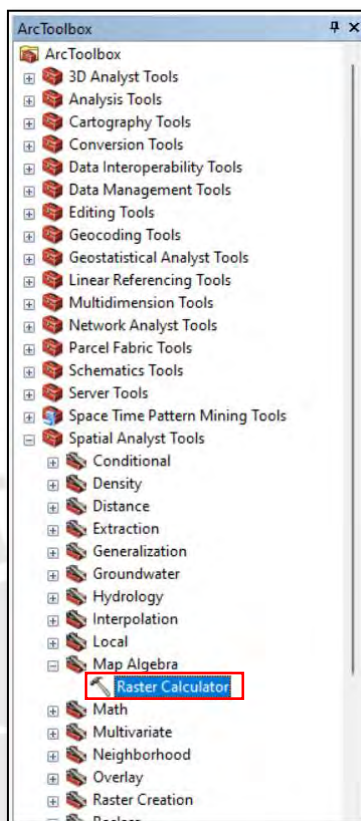
De acuerdo a la tabla 19, se puede inferir que la capa Pendientes posee una importancia relativa aproximadamente tres veces mayor a las capas Sub-Unidades Geomorfológicas y Peligros Geológicos. Por otra parte, la capa Centros Poblados tiene una importancia relativa aproximadamente dos veces mayor que Comunidades Campesinas y seis veces mayor que Predios Rurales. Finalmente, se observa que la capa Área Natural Protegida posee una importancia relativa aproximadamente dos veces mayor que Zona de Amortiguamiento y seis veces mayor que Cobertura Vegetal.

4.1.2.2. Superposición ponderada de capas participantes en ArcMap

Dentro del aplicativo ArcMap, la superposición ponderada de capas se puede realizar mediante el uso de la herramienta Superposición Ponderada (*Weighted Overlay*) o Calculadora Ráster (*Raster Calculator*). En el presente trabajo, la superposición ponderada se realizó mediante el uso de la herramienta *Raster Calculator*, debido a la simplicidad de su uso. Además, minimiza los pasos a seguir para obtener el resultado buscado.

- La herramienta *Raster Calculator* se encuentra ubicada en *Arctoolbox > Spatial Analyst Tools > Map Algebra > Raster Calculator*.

Figura 31
Ubicación de la herramienta raster calculator



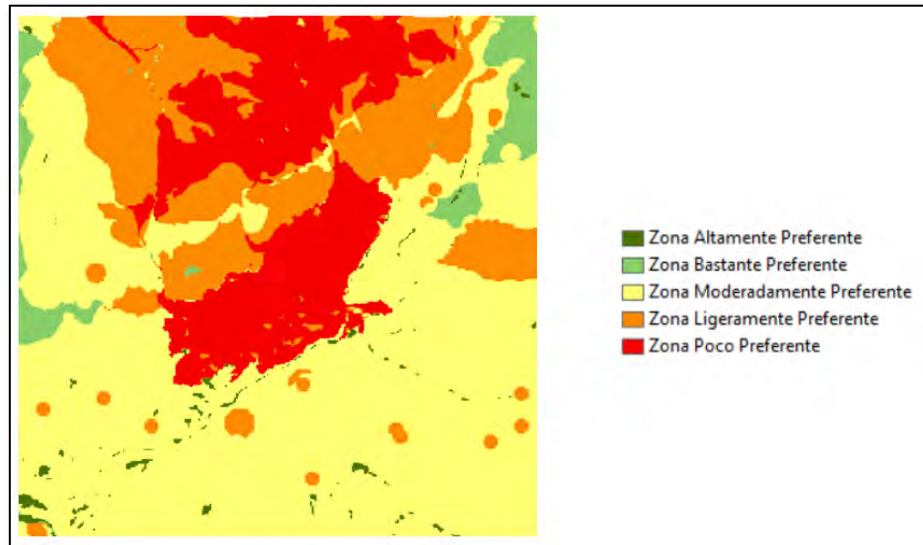
Nota. Herramienta empleada para llevar a cabo la superposición ponderada entre las capas en formato ráster, las cuales han sido reclasificadas en función a sus campos de interés. Elaboración propia.

Luego de haber definido, en el software Expert Choice 11, los valores ponderados para cada capa participante en el modelo, se procedió a configurar la herramienta *Raster Calculator* de la siguiente forma, como se muestra en el Anexo N° 5

Finalmente, luego de procesar los datos de entrada, se obtuvo la siguiente capa, que representa la superposición ponderada de todas las nueve capas reclasificadas anteriormente. Esta capa es una capa restrictiva, que delimita, en función a la reclasificación y valores ponderados obtenidos por el método AHP, las zonas o áreas por donde debe pasar el trazo preliminar propuesto.

Figura 32

Capa resultante de la superposición ponderada de las capas reclasificadas



Nota. Se muestra la capa restrictiva que señala las áreas por donde se recomienda que pase o no pase el trazo preliminar. Elaboración propia.

En la figura 32, se observan las zonas por donde el aplicativo ArcMap reconoce que la ruta preliminar de la carretera debe ser trazada. Por lo tanto, luego de tener una capa restrictiva, falta definir la menor distancia, desde el punto de inicio hasta el punto final, del trazo propuesto. Ello fue definido en el capítulo 4.1.3. *Creación del coste de distancia y ruta de coste.*

4.1.3. Creación del coste de distancia y ruta de coste

Luego de realizar la superposición ponderada de las capas participantes, se debe obtener aquella capa que represente el trazo de la ruta preliminar, con la menor distancia posible. Para lograrlo, se hizo uso de las herramientas *Cost Distance* y *Cost Path*.

De acuerdo a la página web de ArcGIS (<https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/latest/tools/spatial-analyst-toolbox/cost-distance.htm>), la herramienta *Cost Distance* (Coste de Distancia) “calcula el menor coste-distancia acumulativo para cada celda desde o hasta el origen de menor coste por una superficie de coste”. Donde los siguientes factores impactan en el coste de desplazarse de una celda a otra:

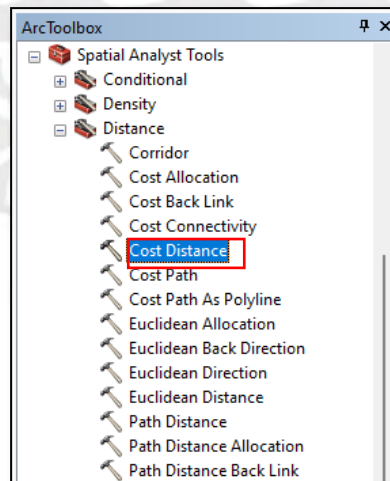
1. Atributos de la superficie (denominada como superficie de coste)
2. Propiedades del objeto en movimiento. Esto podría implicar el método de transporte, como caminar o conducir un vehículo todoterreno.
3. Características del desplazamiento de una celda a otra, como el terreno en ascenso o descenso.

Según la web oficial de ArcGIS (<https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/latest/tools/spatial-analyst-toolbox/cost-distance.htm>), uno de los problemas que busca resolver esta herramienta, es la de identificar la ruta más barata al momento de construir una nueva carretera. Debido a que busca crear una ruta de menor coste entre el origen y el destino.

- La herramienta *Cost Distance*, se encuentra en la ruta *Arc toolbox > Spatial Analyst Tools > Distance > Cost Distance*. Esta fue configurada como se muestra en el Anexo N° 6.

Figura 33

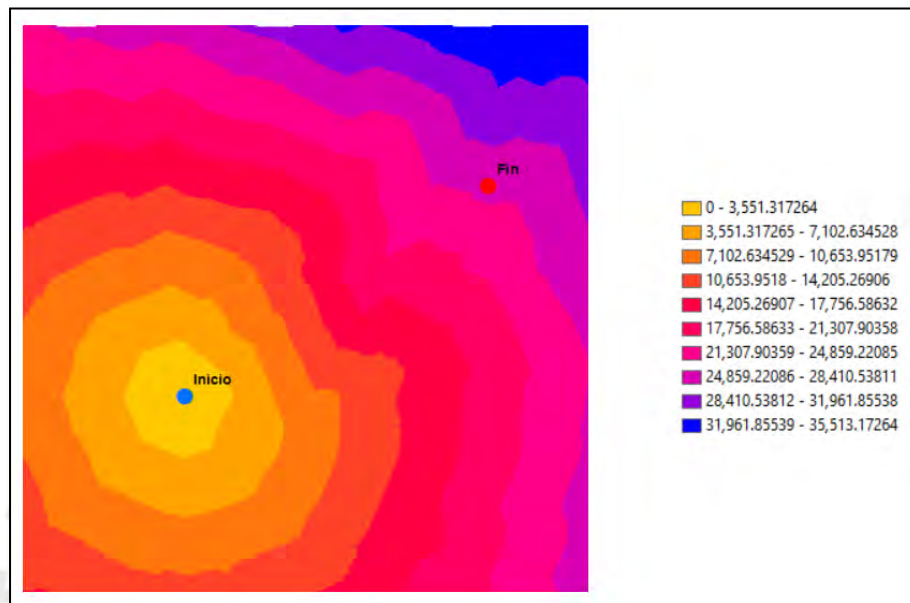
Ubicación de la herramienta Cost Distance



Nota. Se muestra la ubicación de la herramienta de Coste de Distancia. Elaboración propia.

- Luego de ejecutar la herramienta, se obtienen dos capas de salida, la capa de coste de distancia y el backlink, que representa el análisis inverso, es decir, desde el punto final al punto inicial de la carretera.

Figura 34
Capa de coste de distancia

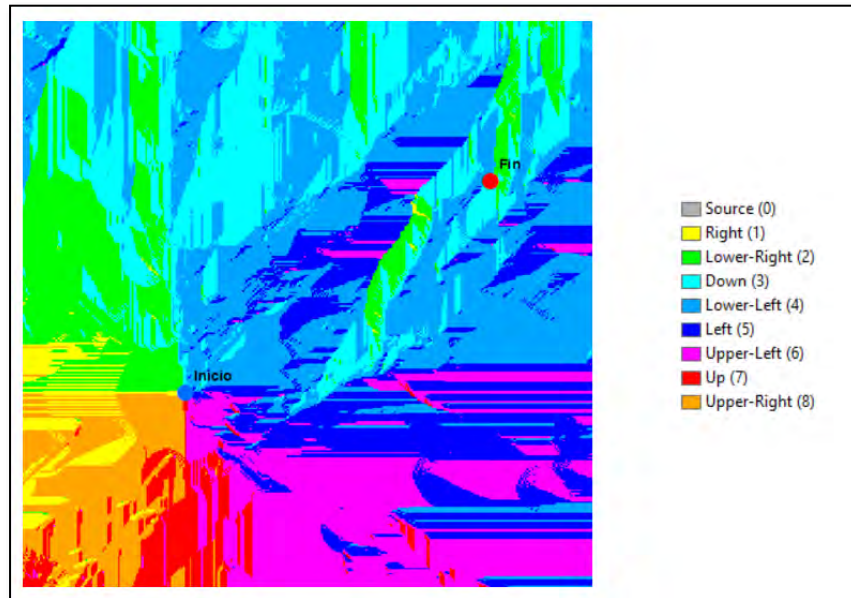


Nota. Se muestra la capa de coste de distancia obtenida, luego de ejecutar la herramienta *Cost Distance*. Elaboración propia.

En la capa de coste de distancia, las zonas cercanas a la ubicación de origen tendrán valores de coste de distancia más bajos (o tonos más claros en una representación cromática), lo que denota una mayor accesibilidad desde esos puntos en términos de tiempo o nivel de dificultad de traslado. En contraste, las áreas más oscuras o con valores más elevados en la capa de coste de distancia señalan áreas que son más costosas o complejas de alcanzar desde el punto de partida. Estas áreas pueden encontrarse a mayor distancia en tiempo o enfrentar condiciones más adversas de desplazamiento.

Figura 35

Capa de backlink de la capa coste de distancia



Nota. Se muestra la capa de backlink resultante de la capa de coste de distancia obtenida, luego de ejecutar la herramienta *Cost Distance*. Elaboración propia.

La capa backlink es un indicador de accesibilidad inversa, porque permite ver desde dónde se puede llegar a una ubicación específica. Muestra las celdas adyacentes que contribuyen al acceso a una ubicación determinada. Se complementa con la capa de coste de distancia. Donde esta muestra cómo de costoso es llegar desde una ubicación específica a otras celdas, mientras que la capa de backlink muestra cómo es posible llegar a la ubicación específica desde otras celdas. Además, la capa de backlink asegura que los cálculos de coste de distancia sean bidireccionales y coherentes. Ayuda a considerar las condiciones de movimiento en ambas direcciones en la red de rutas.

Por ejemplo, los valores textuales, como *Source*, *Right*, *Lower-Right*, entre otros, significan lo siguiente:

- *Source*: Esta etiqueta se refiere a la celda misma. Indica que esa celda es el punto de origen, por lo que el valor en esta celda es cero, ya que es una ubicación de partida.

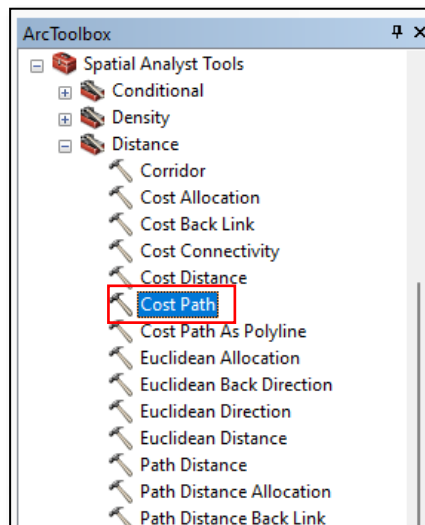
- *Right*: Significa que la celda en cuestión es accesible desde la celda de su derecha. En términos de desplazamiento, se puede llegar a esta celda desde la derecha.
- *Lower-Right*: Indica que la celda es accesible desde la celda ubicada en la esquina inferior derecha.

De acuerdo a la página web de ArcGIS (<https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/latest/tools/spatial-analyst-toolbox/cost-path.htm>), la herramienta Cost Path (Ruta de Coste) genera un ráster que registra la ruta de menor coste desde las ubicaciones elegidas hasta la celda de inicio más cercana, definida en la superficie de coste acumulativo, en términos de distancia de coste. Generalmente, se ejecuta una o más herramienta de coste ponderado, como la herramienta Cost Distance, antes de ejecutar la herramienta Cost Path. Ello con el objetivo de crear los rásteres de distancia de coste y del backlink, los cuales son datos de entrada para la herramienta de Ruta de Coste.

Según la web oficial de ArcGIS (<https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/latest/tools/spatial-analyst-toolbox/creating-the-least-cost-path.htm>), la herramienta Ruta de Coste tiene la finalidad de encontrar la mejor ruta para una carretera de nuevo trazo, en términos de costes de construcción.

- La herramienta *Cost Path*, se encuentra en la ruta *Arctoolbox > Spatial Analyst Tools > Distance > Cost Path*. Esta fue configurada como se muestra en el Anexo N° 7

Figura 36
Ubicación de la herramienta Cost Path



Nota. Se muestra la ubicación de la herramienta de Ruta de Coste. Elaboración propia.

- Luego de ejecutar la herramienta, se obtiene la capa de salida de Ruta de Coste.

Figura 37
Capa Ruta de Coste



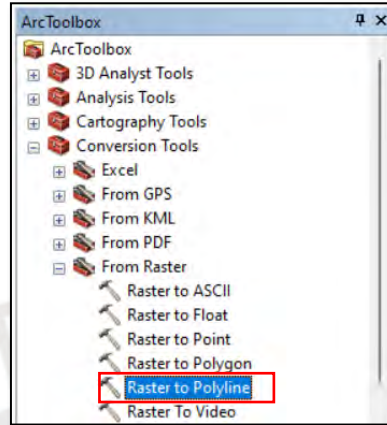
Nota. Se muestra la capa de ruta de coste obtenida, luego de ejecutar la herramienta *Cost Path*. Elaboración propia.

- Luego, para obtener las características geométricas, como la distancia de la capa generada, se transformó a un formato vectorial del tipo polilínea con la herramienta *Raster to Polyline*. Esta herramienta se encuentra ubicada en la ruta *ArcToolbox >*

Conversion Tools > From Raster > Raster to Polyline. Además, fue configurada como se muestra en el Anexo N° 8

Figura 38

Ubicación de la herramienta Raster to Polyline



Nota. Se muestra la ubicación de la herramienta de *Raster to Polyline*. Elaboración propia.

- Luego de ejecutar la herramienta, se obtiene la capa de salida de Ruta de Coste en formato vectorial del tipo polilínea.

Figura 39

Capa Ruta de Coste en formato vectorial

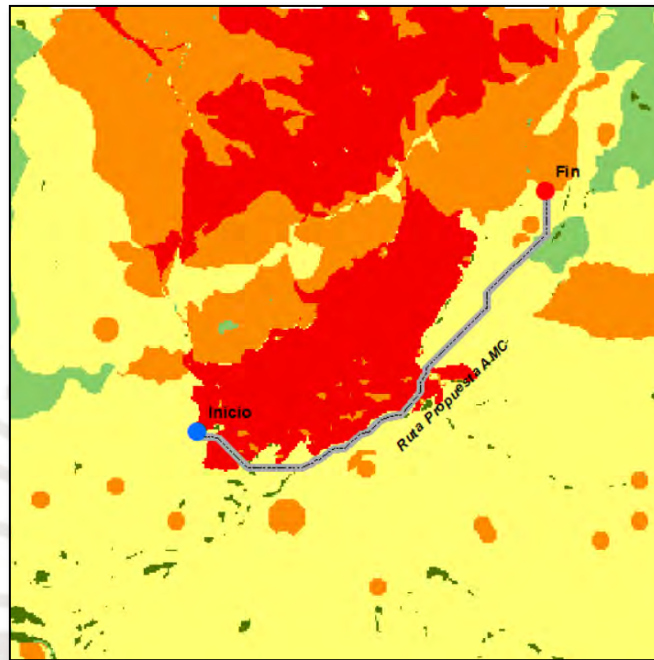


Nota. Se muestra la capa de ruta de coste en formato vectorial. Obtenida, luego de ejecutar la herramienta *Raster to Polyline*. Elaboración propia.

Entonces, luego de obtener la ruta propuesta, mediante la herramienta *Cost Path*, se procedió a superponerla sobre la capa de Superposición Ponderada para poder realizar el análisis del resultado obtenido, como se observa en la figura 40.

Figura 40

Capa de Ruta Propuesta por el Método de Análisis Multicriterio (AMC)



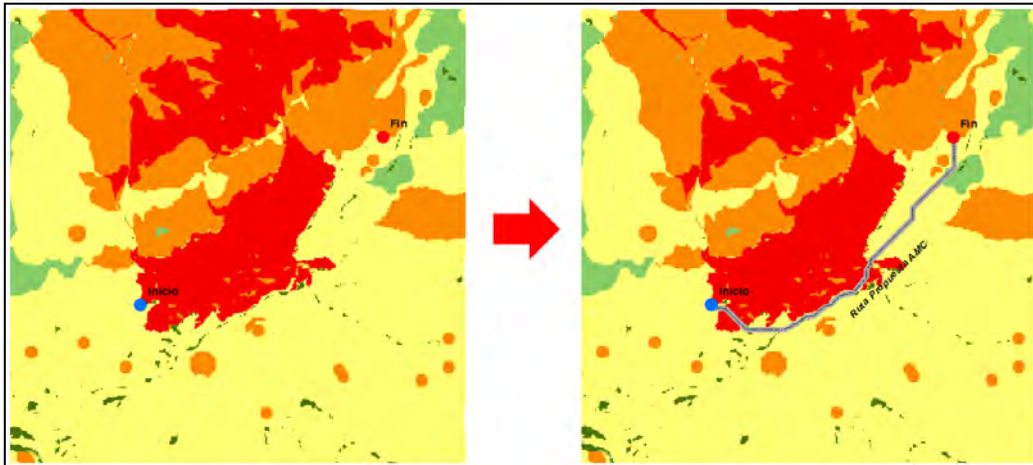
Nota. Se muestra la capa propuesta por el método de análisis multicriterio desarrollado en el aplicativo ArcMap. Elaboración propia.

Se observa la ruta preliminar propuesta mediante el método AMC, desarrollado en el aplicativo ArcMap. A partir de ella, se obtuvo una distancia longitudinal aproximada de 8089.56 m u 8.09 km, desde el punto de inicio al punto final de la vía.

En la figura 40, se puede observar cómo la ruta preliminar propuesta, busca la ruta más corta que pase en su mayoría por las zonas altamente preferentes (áreas de color verde oscuro) para llegar a su destino final.

Figura 41

Comparación entre Capa de Superposición Ponderada y Capa de Ruta Propuesta



Nota. Se muestra la comparación entre la capa de superposición ponderada y la capa con la ruta preliminar propuesta por el método de AMC. Elaboración propia.

Finalmente, los resultados se resumen en el plano mostrado en el Anexo N° 9.

4.1.4. Automatización del modelo

Con el objetivo de simplificar todos los procesos realizados en los apartados 4.1.1. *Preparación de capas*, 4.1.2. *Superposición ponderada de capas* y 4.1.3. *Creación del coste de distancia y ruta de coste*, explicados anteriormente, se automatizó el modelo mediante el uso de *ModelBuilder*, una aplicación de ArcMap.

De acuerdo a la página web de ArcGIS (<https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/latest/analyze/modelbuilder/what-is-modelbuilder.htm>), *ModelBuilder* es una aplicación que posibilita la creación, edición y gestión de modelos, los cuales son procedimiento de trabajo que hacen uso de herramienta de geo procesamiento. Este sistema facilita la transferencia de la salida de una herramienta como de entrada para otra. De manera conceptual, se puede considerar a *ModelBuilder* como un lenguaje de programación visual diseñado para construir flujos de trabajo.

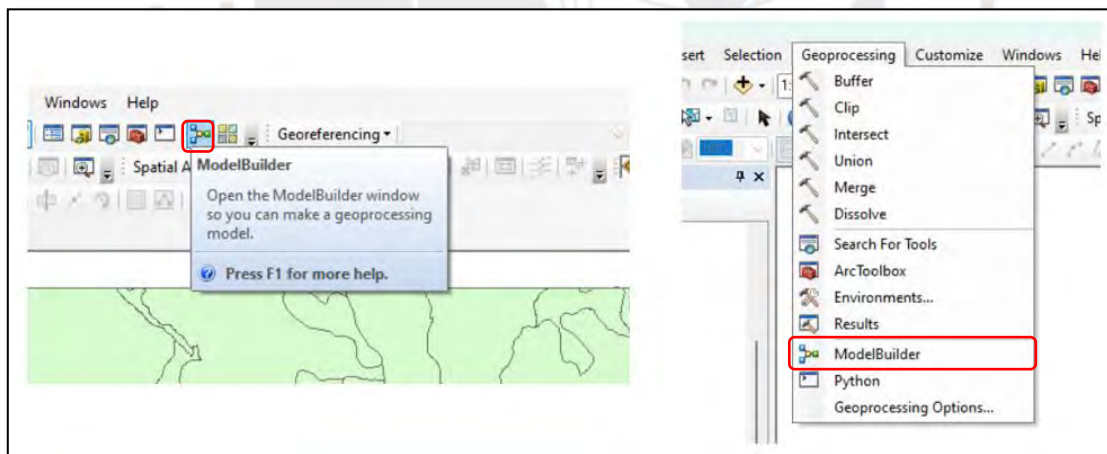
Las ventajas de utilizar *ModelBuilder* son:

- Es un aplicativo fácil de usar para crear y ejecutar flujos de trabajo que contienen una herramienta de secuencia de comandos.
- Permite crear herramientas propias, que pueden utilizarse en secuencias de comando de Python y otros modelos.
- *ModelBuilder*, junto con las secuencias de comandos, es una forma de integrar ArcGIS en otras aplicaciones.

De manera similar al modelo generado anteriormente, se anticipa lograr el mismo resultado mediante la automatización empleando la herramienta *ModelBuilder*. Este aplicativo está disponible en la barra de herramientas de ArcMap o, alternativamente, se puede encontrar en la pestaña *Geoprocessing*, como se evidencia en la siguiente imagen.

Figura 42

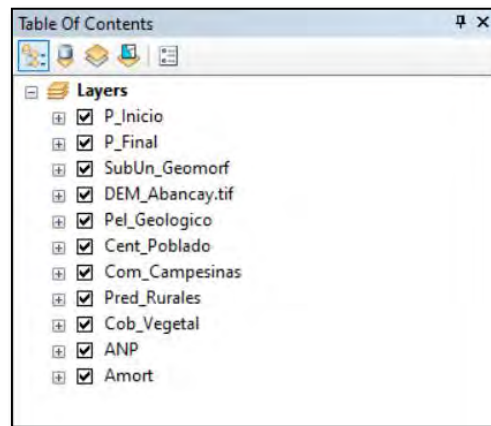
Ubicación de la herramienta ModelBuilder en ArcMap



Nota. Se observa, dentro del software ArcMap, la ubicación de la herramienta *ModelBuilder*. Elaboración propia.

Al igual que en el modelo generado anteriormente (no automatizado), para obtener la ruta propuesta, se abrió un nuevo proyecto en ArcMap y se cargaron las capas participantes definidas previamente en la tabla 7. Es decir, nueve capas, aparte de los puntos de inicio y fin de la vía como se observa en la siguiente imagen.

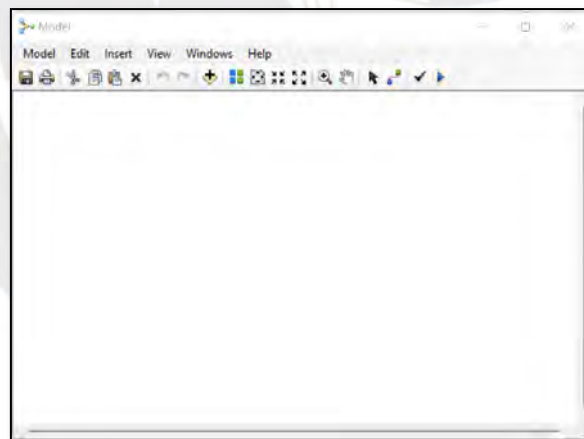
Figura 43
Capas participantes



Nota. Se observan las capas participantes que se usarán para la elaboración del modelo con *ModelBuilder*. Elaboración propia.

Después de cargar las capas en ArcMap, se abrió la aplicación *ModelBuilder* para crear una nueva caja de herramientas, llamada *New Toolbox*, donde se guardó el modelo automatizado, como se evidencia en la siguiente imagen.

Figura 44
Aplicativo ModelBuilder de ArcMap



Nota. Ventana inicial del aplicativo *ModelBuilder*, sobre el cual se ejecuta la automatización de los procesos que conllevan al modelo final. Elaboración propia.

Después de cargar las capas involucradas y guardar el modelo donde se llevaron a cabo los procesos automatizados, se avanzó a establecer los procesos que se visualizarán al utilizar la aplicación. Estos son idénticos a los que se llevaron a cabo durante el procedimiento descrito con anterioridad, es decir, durante el proceso no automatizado.

Los procesos que se llevaron a cabo, fueron la conversión de capas a formato ráster, la reclasificación de las mismas, la superposición ponderada de las capas reclasificadas y la ejecución de las herramientas coste de distancia y ruta de coste. En conclusión, los pasos fueron los mismos que los realizados durante el proceso no automatizado; sin embargo, estos fueron definidos visualmente en un diagrama de flujo, que tienen la estructura mostrada en la figura 45.

Figura 45
Estructura de procesos automatizados con ModelBuilder



Nota. Estructura del procedimiento automatizado en *ModelBuilder*. Elaboración propia.

A continuación, se muestran todos los procesos llevados a cabo en el procedimiento automatizado, donde la elipse color azul representa a las capas iniciales de entrada, los rectángulos color naranja representan las herramientas seleccionadas para trabajar las capas, y las elipses color verde representan las capas de salida obtenidas y también a las capas de entrada para los siguientes procesos mostrados en la figura 46.

Figura 46
Estructura detallada de la automatización de los procesos con ModelBuilder



Nota. Se muestran las capas de entrada y salida usadas, además de las herramientas que se usaron para ser procesadas en el modelo automatizado. Elaboración propia.

En los siguientes párrafos se describen los procesos llevados a cabo durante la automatización con *ModelBuilder*:

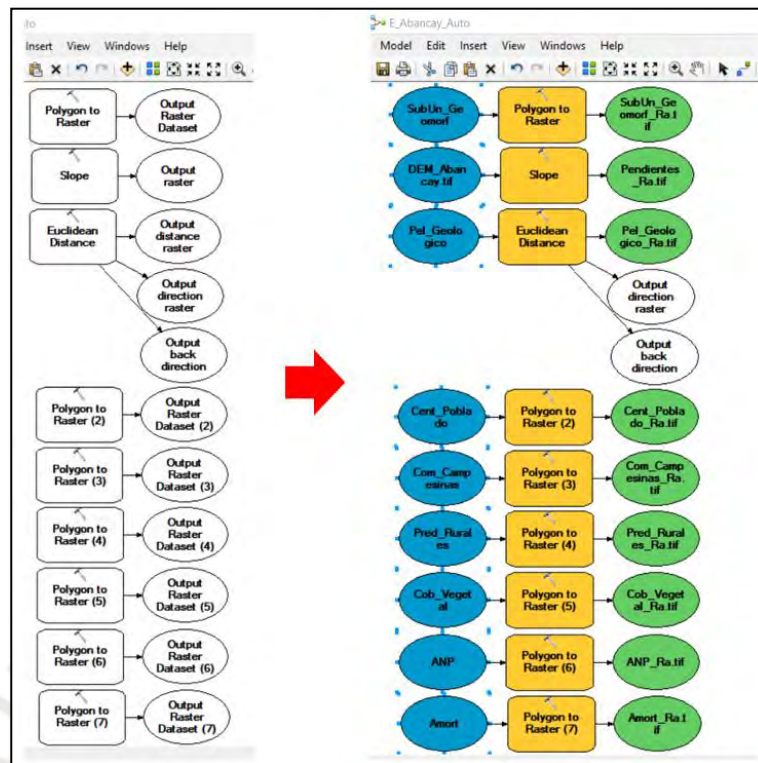
- **Conversión a formato ráster:**

Las capas participantes en el modelo, que suman nueve en total, además de los puntos de inicio y fin, experimentaron una transformación a formato ráster mediante el empleo de las herramientas *Polygon to Raster*, *Slope* y *Euclidean Distance*. Cada una de estas fue aplicada a las capas originales que estaban en formato vectorial del tipo polígonos, modelos de elevación digital y formato vectorial del tipo puntos.

Para realizar estas conversiones, se llevaron las herramientas de conversión a la ventana del *ModelBuilder*. Se repitió este proceso tantas veces como capas se requerían convertir a formato ráster. Además, para asegurar un orden secuencial, se decidió ejecutar cada proceso en columnas separadas. Por otra parte, para establecer la configuración de cada herramienta de reclasificación con las capas respectivas, se realizó una doble pulsación sobre cada una de ellas. Posteriormente, se aplicó la misma configuración que se había empleado en el modelo no automatizado.

Figura 47

Automatización de las herramientas de conversión a formato ráster

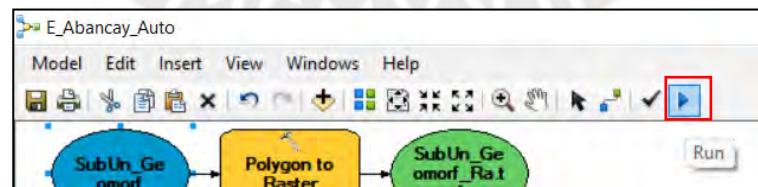


Nota. En la figura se observa cómo fueron configuradas a secuenciadas las herramientas de conversión a formato ráster. Elaboración Propia.

Finalmente, para ejecutar las herramientas con las capas ya configuradas, se procedió a correr el modelo haciendo clic en el botón *Run*, ubicado en la pestaña correspondiente dentro de la ventana *ModelBuilder*.

Figura 48

Ejecución del modelo con el botón run



Nota. Se observa el botón *Run*, usado para correr (ejecutar) las herramientas automatizadas en *ModelBuilder*. Elaboración Propia.

• **Reclasificación de las capas en formato ráster:**

Para reclasificar las capas, se usó la herramienta *Reclassify*, que fue arrastrada a la ventana *ModelBuilder*, tantas veces como capas se reclasificaron. Para seguir la secuencia y orden

de los procesos, se optó por colocar las herramientas de reclasificación a continuación de las de conversión. Luego, se configuró cada una de ellas con sus capas respectivas. Cabe mencionar, que la forma de hacerlo es igual que en el proceso no automatizado. Finalmente, se hace clic en *Run* para ejecutar las herramientas configuradas con sus respectivas capas.

Para llevar a cabo la reclasificación de las capas, se empleó la herramienta *Reclassify*, la cual se incorporó a la ventana de *ModelBuilder* en la misma cantidad de ocasiones que capas requerían la reclasificación. Para preservar la secuencia y organización de los procedimientos, se eligió disponer de las herramientas de reclasificación a continuación de las de conversión. Posteriormente, se configuró cada una de las herramientas con sus respectivas capas.

Es importante destacar que el método empleado para realizar estas configuraciones es el mismo que el utilizado en el proceso no automatizado. Luego, se hizo clic en el botón *Run*, permitiendo que las herramientas se ejecuten.

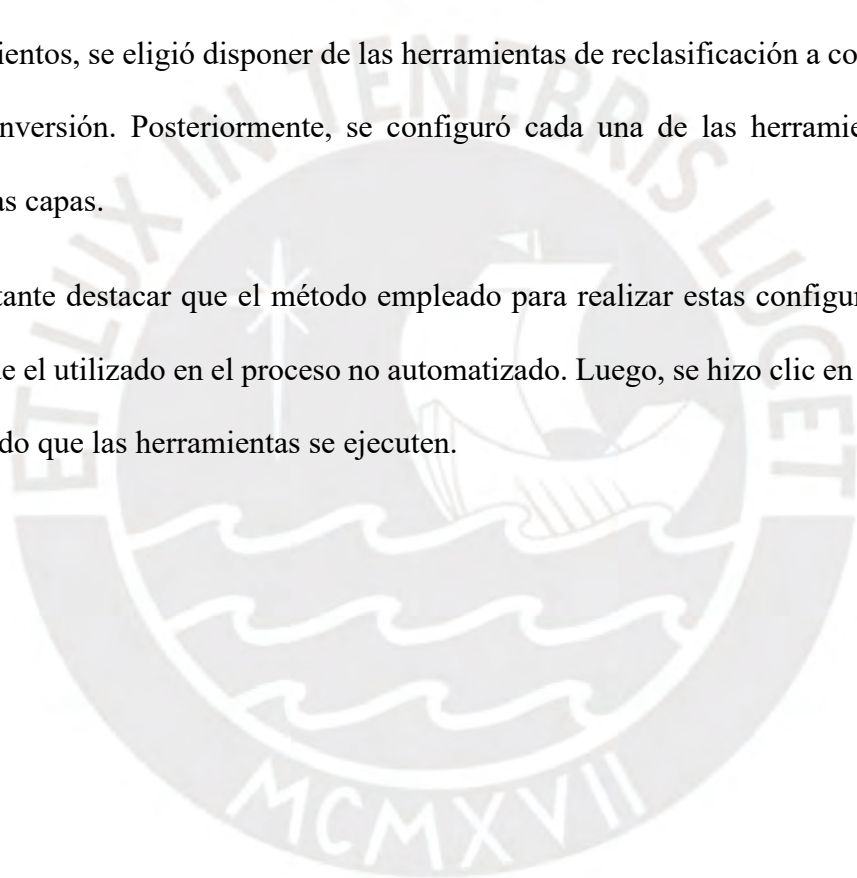


Figura 49

Automatización de las herramientas de reclasificación



Nota. Se observa la forma en que fueron secuenciadas las herramientas de reclasificación. Elaboración Propia.

- **Superposición ponderada de capas:**

Con el propósito de superponer las capas reclasificadas, se empleó el proceso de análisis jerárquico (AHP), siguiendo el mismo enfoque del modelo no automatizado. Dado que se trata del mismo proyecto, los porcentajes de importancia relativa asignados a las capas se mantuvieron inalterados con respecto a los calculados anteriormente.

La herramienta *Raster Calculator* se incorporó a la ventana de *ModelBuilder* en una sola ocasión, dado que combina las nueve capas reclasificadas, siguiendo una lógica secuencial en los procesos. Además, la configuración de la herramienta *Raster Calculator*, fue la misma que se describió anteriormente, en el procedimiento no automatizado.

Luego, se corrió el modelo con el botón *Run*, permitiendo que la herramienta *Raster Calculator* se ejecute. Después, para observar la capa resultante, es decir, la de

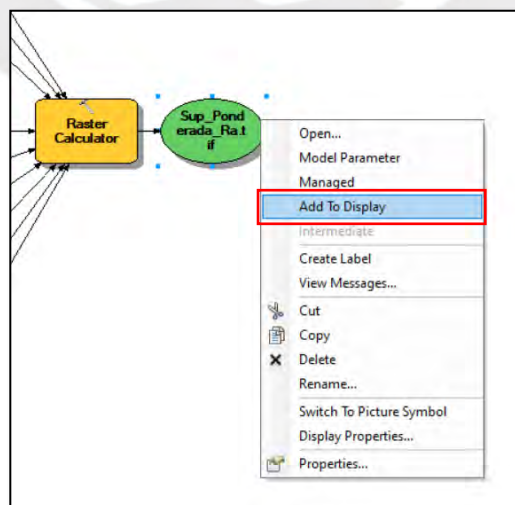
superposición ponderada, se procedió haciendo clic derecho en la capa de salida (representada por una elipse color verde) y se seleccionó *Add To Display*.

Figura 50
Automatización de la herramienta Raster Calculator



Nota. Se observa la forma en que fue secuenciada la herramienta que permite superponer las capas reclasificadas (*Raster Calculator*). Elaboración Propia.

Figura 51
Opción Add To Display de la capa de salida

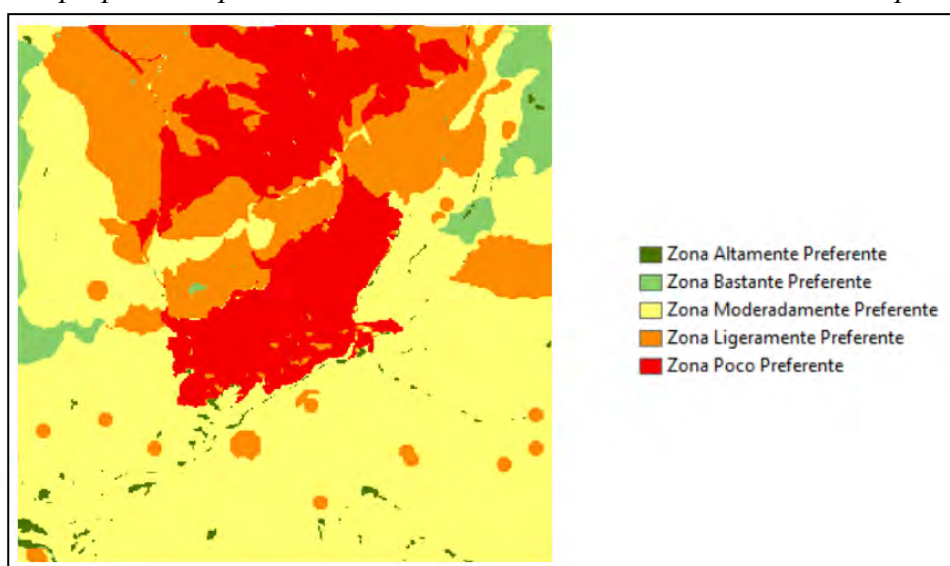


Nota. Opción que permite observar la capa seleccionada de la ventana de *ModelBuilder*. Elaboración Propia.

Finalmente, en la figura 52, se observa la capa de salida de la superposición ponderada de las capas reclasificadas, demostrándose que el resultado es el mismo. Sin embargo, al ser configurado como un proceso automatizado, *Raster Calculator* y cualquiera de las herramientas previamente procesadas, pueden ser modificadas cuantas veces sea conveniente para el proyecto.

Figura 52

Capa de superposición ponderada, obtenida mediante la automatización de procesos



Nota. Capa resultante, luego de ejecutar la herramienta *Raster Calculator*, que permite obtener la superposición ponderada de las capas reclasificadas. Elaboración Propia.

- **Coste de distancia:**

Con el propósito de ejecutar el coste de distancia, basada en la capa resultante de la superposición ponderada, se utilizó la función *Cost Distance*. Esta función se incorporó arrastrándola a la ventana *ModelBuilder*. Para ajustar sus parámetros, se realizó un doble clic en la herramienta y se procedió a cargar las capas correspondientes, tal como se detalló en el enfoque no automatizado. Para correr los procesos, se presionó el botón *Run* dentro de la ventana *ModelBuilder*.

Figura 53
Automatización de la herramienta Cost Distance

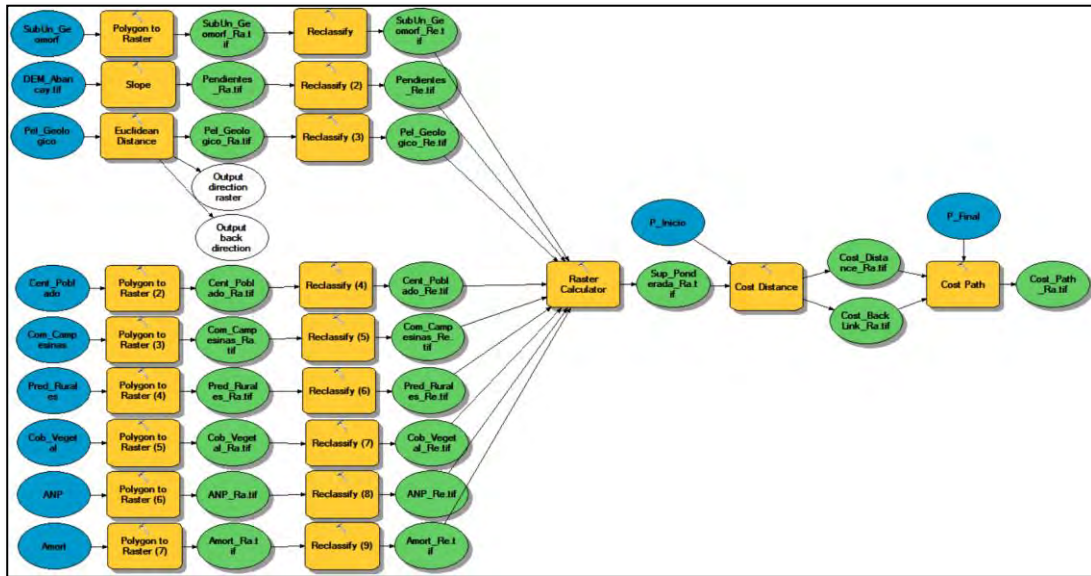


Nota. Se observa la secuencia de herramientas que han sido automatizadas, hasta llegar a *Cost Distance*.
 Elaboración Propia.

- **Ruta de coste:**

Para llevar a cabo el cálculo de la ruta de coste, se utilizó la herramienta *Cost Path*, la cual fue arrastrada una sola vez a la ventana *ModelBuilder*. Luego, se configuró pulsando doble clic sobre esta y cargando las capas correspondientes, siguiendo el mismo procedimiento que se detalló en el modelo no automatizado. Finalmente, se ejecutó la herramienta haciendo clic en el botón *Run* de *ModelBuilder*.

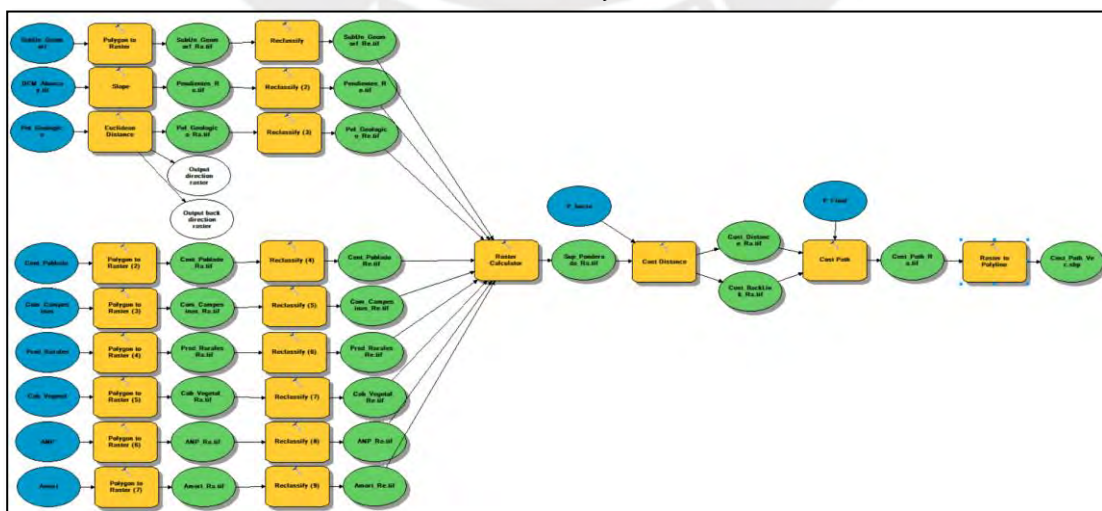
Figura 54
Automatización de la herramienta Cost Path



Nota. Se observa la secuencia de herramientas que han sido automatizadas, hasta llegar a Cost Path. Elaboración Propia.

Después, con el propósito de obtener las propiedades geométricas, como la distancia, se realizó una conversión a un formato vectorial del tipo polilínea, mediante la herramienta *Raster to Polyline*. Esta fue arrastrada una vez a la ventana *ModelBuilder*, y se configuró como fue explicado en el procedimiento no automatizado. Luego, para ejecutar la herramienta se hizo clic en el botón *Run*.

Figura 55
Automatización de la herramienta Raster to Polyline

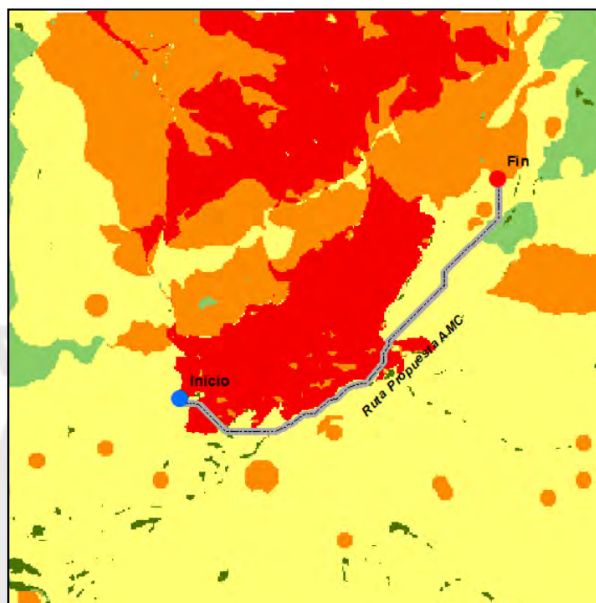


Nota. Se observa la secuencia de herramientas que han sido automatizadas, hasta llegar a Raster to Polyline. Elaboración Propia.

Finalmente, se desplegó la capa de salida y se activaron las capas correspondientes a Punto de Inicio, Punto Final, Superposición Ponderada, y Ruta de Coste (en formato vectorial), obteniendo el mismo resultado que en el proceso no automatizado.

Figura 56

Capa de Ruta Propuesta por el método de análisis multicriterio (AMC), modelo automatizado



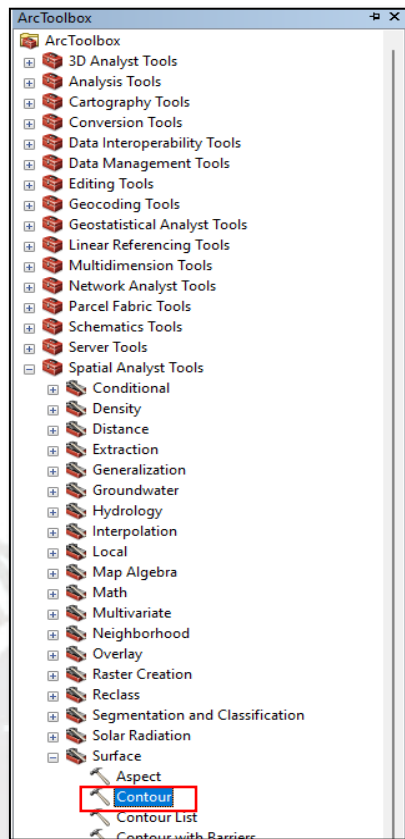
Nota. La figura muestra la ruta propuesta obtenida mediante la aplicación del método de análisis multicriterio en el aplicativo ArcMap, del software ArcGIS, a partir de la automatización de procesos. Elaboración Propia.

4.2. Método de la Línea de Gradiente Aplicado en Civil3D para Determinar el Trazo Preliminar de la Vía de Evitamiento de la Ciudad de Abancay

4.2.1. Obtención de mapa de curvas de nivel

El mapa de curvas de nivel fue obtenido a partir de la capa Modelo de Elevación Digital (DEM), trabajado durante la propuesta de trazo preliminar con el método AMC. Para ello, se hizo uso de la herramienta *Contour*, que se encuentra en la ruta *Arctoolbox > Spatial Analyst Tools > Surface > Contour*, como se muestra en la figura 57.

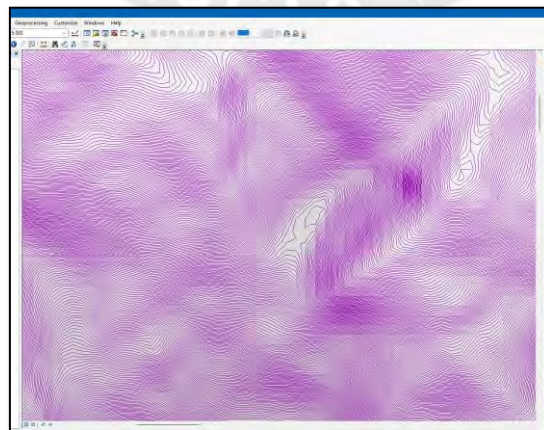
Figura 57
Herramienta Contour, para la obtención curvas de nivel



Nota. Herramienta usada para obtener el mapa de curvas de nivel a partir del DEM. Elaboración propia.

Luego, se abrió la siguiente ventana de configuración de la herramienta *Contour*, la cual fue configurada como se muestra en el Anexo N° 10. Obteniéndose el resultado mostrado en la figura 58.

Figura 58
Mapa de curvas de nivel



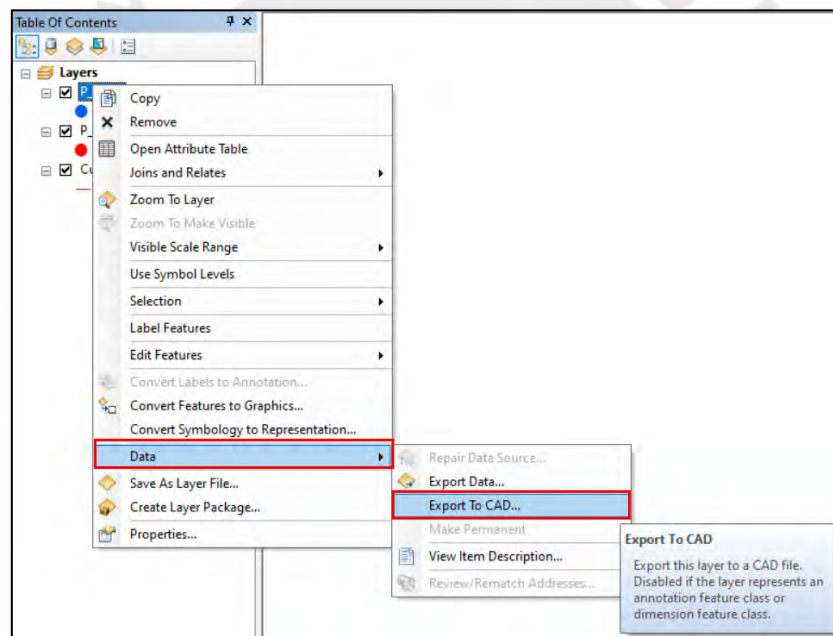
Nota. La figura muestra el mapa de curvas de nivel, obtenido a partir del DEM, usando la herramienta *Contour*. Elaboración propia.

4.2.2. Extracción y exportación de capas de ArcMap a Civil3D

La capa del mapa de curvas de nivel, obtenido mediante el uso de la herramienta *Contour*, y las capas que contienen el punto de inicio y el punto final de la vía de evitamiento, fueron exportados al software Civil3D, para poder realizar el método de la línea de gradiente.

Para exportar cada capa, desde el aplicativo ArcMap a Civil3D, se usó la función *Export To CAD*, haciendo clic derecho sobre cualquiera de las capas que se encuentran en la tabla de contenidos y luego, en la opción *Data*, se hizo clic sobre *Export To CAD*, como se muestra en la figura 59. Además, fue configurada como se muestra en el Anexo N° 11.

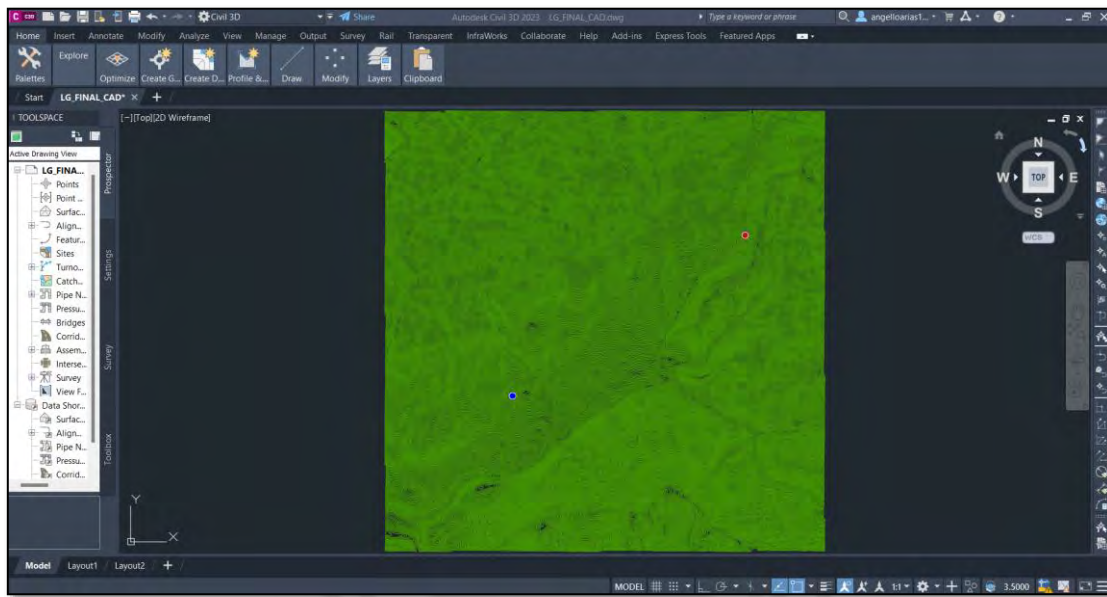
Figura 59
Función Export To CAD



Nota. La figura muestra la selección de una capa siendo exportada a Civil3D, mediante la función *Export To CAD* de ArcMap. Elaboración propia.

Finalmente, luego de procesar la configuración, se abrió el archivo generado en el software Civil3D, sobre el cual se observan las capas exportadas, que sirvieron para realizar los trazos propuestos mediante el método de la línea de gradiente.

Figura 60
Capas exportadas de ArcMap a Civil3D



Nota. La figura muestra las capas exportadas desde el aplicativo ArcMap al software Civil3D. Elaboración propia.

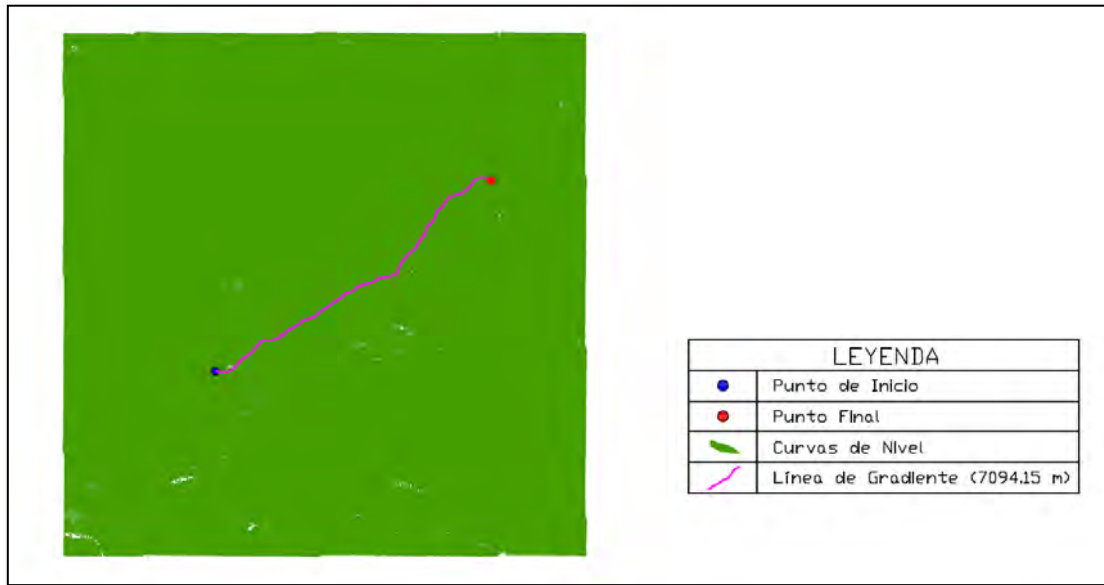
4.2.3. Aplicación del Método de la Línea de Gradiente

Luego de exportar las capas (mapa de curvas de nivel, punto de inicio y punto final de la vía) al software Civil3D, se realizó el método de la línea de gradiente, tal y como fue explicado en el capítulo 2.3.3. *Método de la línea de gradiente* y el capítulo 3.1.2. *Trazo preliminar de la carretera aplicando el método de la línea de gradiente en Civil3D*.

En la figura 61, se observa el resultado obtenido luego de realizar el método de la línea de gradiente, considerando las capas mencionadas en el párrafo anterior. En ella se determinó que la distancia del trazo preliminar de la ruta propuesta es 7094.15 m.

Figura 61

Trazo preliminar obtenido por el método de la línea de gradiente

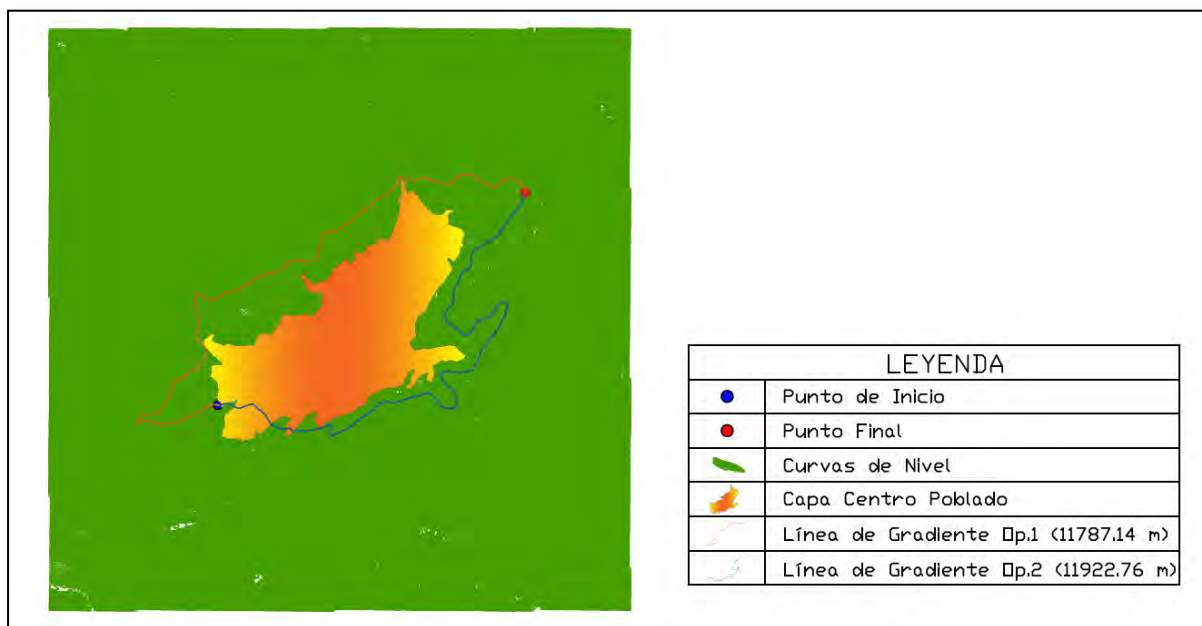


Nota. La figura muestra el resultado obtenido tras realizar el método de la línea de gradiente, considerando solamente las capas de mapa de curvas de nivel, y los puntos de inicio y fin de la vía. Elaboración propia.

Luego de realizar el método de la línea de gradiente, considerando solamente las 3 capas mencionadas, se realizaron otras dos propuestas. Estas se realizaron, debido a que la naturaleza del caso de estudio es una vía de evitamiento, y su principal propósito es evitar pasar por el área urbana de la ciudad de Abancay. Por lo tanto, se exportó la capa Centro Poblado, de ArcMap a Civil3D. Como fue explicado con anterioridad, esta capa representa al casco urbano de la ciudad de Abancay.

Figura 62

Trazo preliminar que considera el casco urbano de la ciudad de Abancay



Nota. La figura muestra el resultado obtenido tras realizar el método de la línea de gradiente, considerando las capas de mapa de curvas de nivel, punto de inicio de la vía, punto final de la vía y la capa Centro Poblado. Elaboración propia.

En la figura 62, se observa que se realizaron dos propuestas del trazo preliminar de la ruta de la vía de evitamiento, ambas, en términos ingenieriles, de la misma longitud. Sin embargo, de las tres propuestas obtenidas, solamente *Línea de Gradiente Op.1* y *Línea de Gradiente Op.2*, fueron comparadas con la ruta propuesta mediante el método de análisis multicriterio aplicado en ArcMap (aplicativo de ArcGIS), denominada *Ruta Propuesta AMC*.

En el Anexo N° 12 y el Anexo N° 13, se presentan los planos con las propuestas obtenidas por medio del método de la línea de gradiente aplicado en Civil3D.

Capítulo V: Comparación de Propuestas

Se conoce que los trazos propuestos son referenciales, debido a que a partir ellos se podrá realizar el diseño geométrico de la carretera, que deberá seguir los parámetros establecidos en el Manual de Carreteras Diseño Geométrico DG-2018. Por lo tanto, las cuatro propuestas pueden ser consideradas como tentativas durante las primeras etapas de un proyecto de carretera. Sin embargo, como se mencionó anteriormente, el presente caso de estudio es una vía de evitamiento. En consecuencia, se descarta por defecto, para la comparación de propuestas, el trazo denominado *Línea de Gradiente*, debido a que pasa por dentro del casco urbano de la ciudad de Abancay.

En la tabla 20, se muestran los trazos de ruta preliminar propuestos para la Vía de Evitamiento de la Ciudad de Abancay. Los cuales fueron sometidos al método AHP para determinar la mejor de las alternativas, en función a criterios que serán descritos en párrafos posteriores.

Tabla 20

Trazos preliminares propuestos para la Vía de Evitamiento de la Ciudad de Abancay

<u>Ruta Propuesta</u>
Ruta Propuesta AMC
Línea de Gradiente Op.1
Línea de Gradiente Op.2

Nota. La tabla muestra las 3 rutas preliminares propuestas que fueron sometidas al método AHP. Elaboración propia.

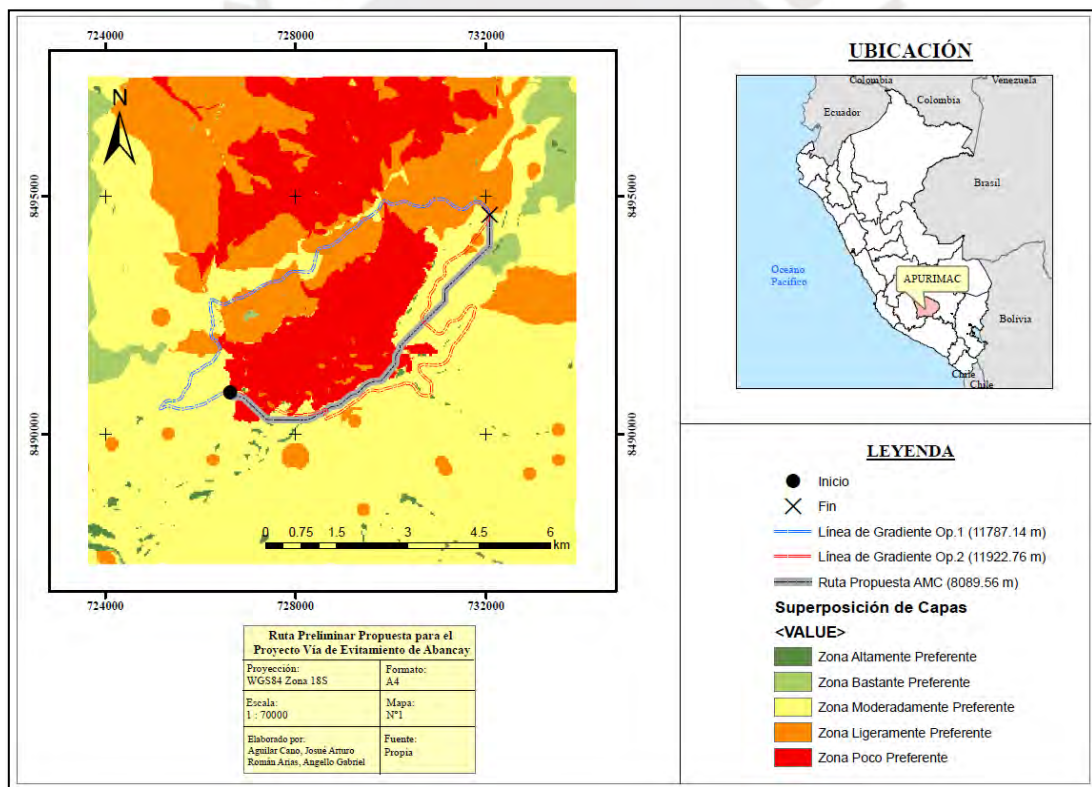
5.1. Proceso de Análisis Jerárquico (AHP) en Expert Choice 11

El proceso de análisis jerárquico fue realizado en el software Expert Choice 11, siguiendo los procedimientos explicados en el capítulo 4.1.2. *Superposición ponderada de capas*. Sin embargo, para la comparación de resultados, se definieron dos nuevos criterios de tercer nivel, a los cuales se les denominó: Longitud y Pendiente Longitudinal.

El criterio Longitud, representa a la distancia de recorrido de cada propuesta de trazo preliminar. Por otra parte, Pendiente Longitudinal, representa la pendiente longitudinal promedio de cada una de las 3 propuestas evaluadas. Ambos, formarán parte de los criterios primarios y secundarios, denominados como Aspectos Generales y Criterios Base, respectivamente.

En la figura 63, se presentan los trazos evaluados por medio del método AHP, los cuales fueron denominados: *Ruta Propuesta AMC*, *Línea de Gradiente Op.1* y *Línea de Gradiente Op.2*.

Figura 63
Trazos evaluados por medio del método AHP



Nota. La figura muestra los 3 trazos propuestos que fueron evaluados por medio del método AHP en el software Expert Choice 11. Elaboración propia.

El proceso que se siguió para evaluar cada una de las alternativas mediante el método AHP, fue mediante la comparación visual de los trazos sobre los diferentes criterios evaluados. Es decir, cada trazo fue superpuesto sobre cada capa reclasificada durante la aplicación del

método AMC en ArcMap, debido a que cada capa representa un criterio que ya se encuentra reclasificado (parametrizado) en función a los datos que interesan de cada una de ellas. Además, se consideraron dos criterios adicionales, denominados: Longitud y Pendiente Longitudinal, que no se encuentran como capas, pero permiten la comparación de las propuestas mediante el cálculo de sus medidas.

Por lo tanto, en la tabla 21, se definen los criterios finales considerados para evaluar los trazos propuestos mediante el método AHP.

Tabla 21

Criterios considerados para evaluar los trazos mediante el método AHP

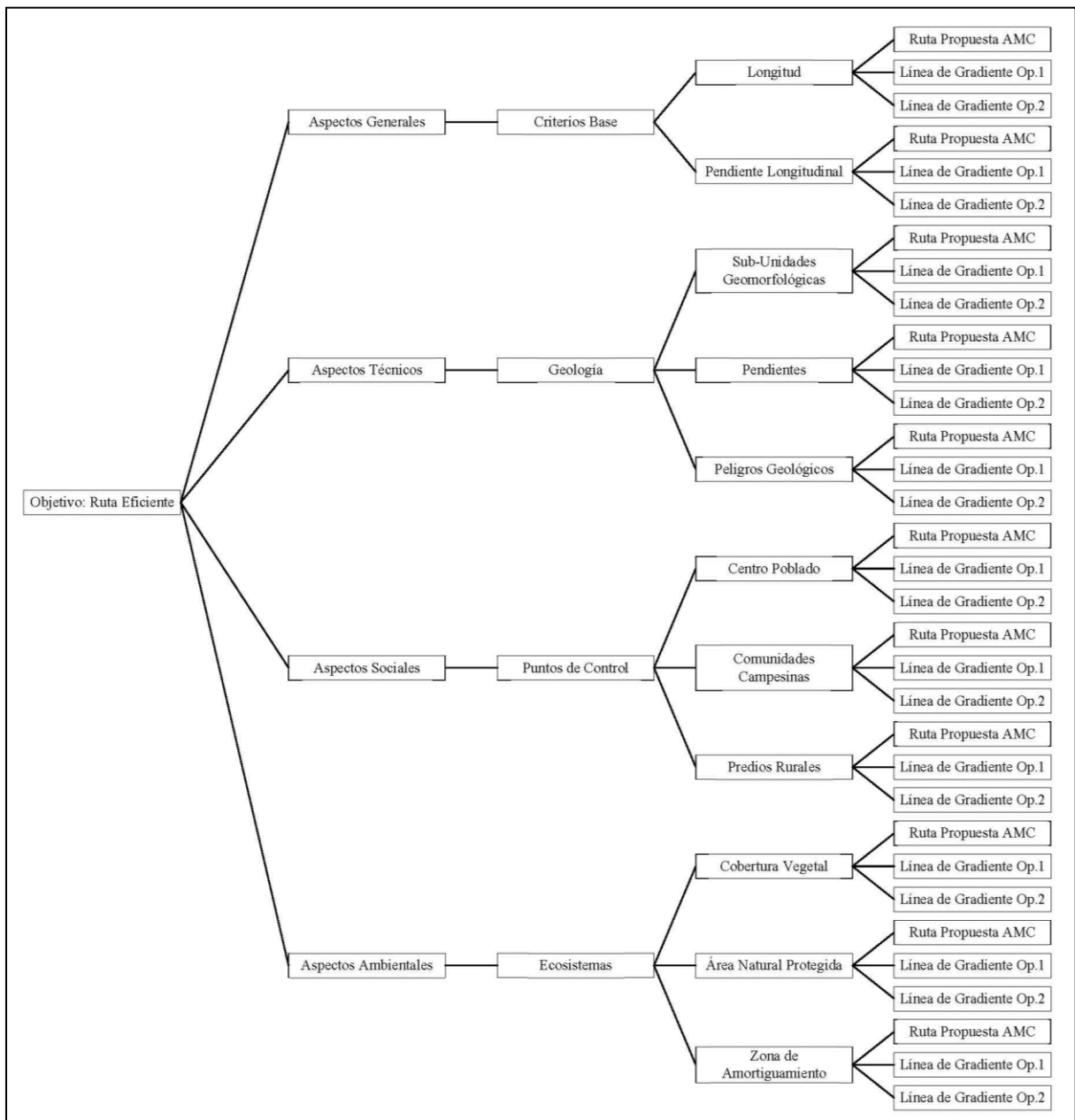
Criterios Primarios	Criterios Secundarios	Criterios Terciarios
Aspectos Generales	Criterios Base	Longitud Pendiente Longitudinal
Aspecto Técnicos	Geología	Sub-Unidades Geomorfológicas Pendientes Peligros Geológicos
Aspectos Sociales	Puntos de Control	Centro Poblado Comunidades Campesinas Predios Rurales
Aspectos Ambientales	Ecosistemas	Cobertura Vegetal Área Natural Protegida Zona de Amortiguamiento

Nota. La tabla muestra los criterios que fueron considerados para evaluar los trazos por medio del proceso de análisis jerárquico (AHP). Elaboración propia.

El método AHP, fue realizado en el software Expert Choice 11, explicado anteriormente. Por lo tanto, las variables a definir fueron: objetivo principal, criterios primarios, criterios secundarios, criterios terciarios y las alternativas. Donde los criterios mencionados se observan en la tabla 21, el objetivo principal es determinar la Ruta Eficiente y las alternativas son las rutas: *Ruta Propuesta AMC*, *Línea de Gradiente Op.1* y *Línea de Gradiente Op.2.*, tal como se muestra en la figura 64, que define el orden jerárquico de las variables.

Figura 64

Jerarquía de las variables en el proceso de análisis jerárquico (AHP)

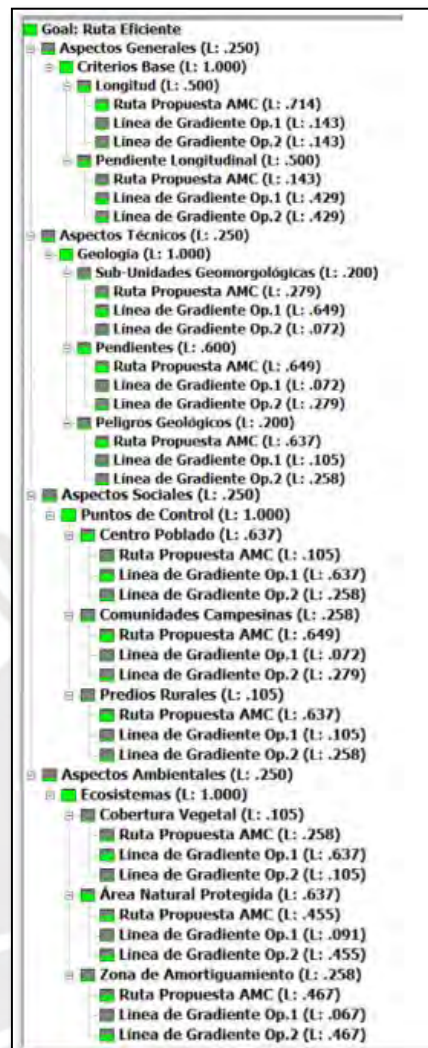


Nota. La figura muestra las variables que se introdujeron al software Expert Choice 11, para realizar el método AHP. Elaboración propia.

Luego de haber establecido las variables para el método AHP, se procedió a ingresarlas como datos de entradas en el software Expert Choice 11, siguiendo la jerarquía del mapa conceptual mostrado previamente, tal y como se muestra en la figura 65.

Figura 65

Datos de entrada en el software Expert Choice 11



Nota. La figura muestra los datos de entrada que fueron ingresados al software Expert Choice 11, para realizar el proceso de análisis jerárquico (AHP). Elaboración propia.

Después de ingresar los datos de entrada, se procedió a completar las matrices de comparación de cada una de las variables. A continuación, se muestra la asignación de los valores, en función de la escala de Saaty, de las matrices de comparación de los criterios primarios y secundarios en Expert choice 11.

En función del objetivo principal, que es seleccionar la ruta eficiente, se consideró que los aspectos generales, técnicos, sociales y ambientales tienen el mismo grado de importancia al momento de evaluar las rutas propuestas.

Figura 66

Matriz de comparación de la variable Goal: Ruta Eficiente

	Aspectos Generales	Aspectos Técnicos	Aspectos Sociales	Aspectos Ambientales
Aspectos Generales		1.0	1.0	1.0
Aspectos Técnicos			1.0	1.0
Aspectos Sociales				1.0
Aspectos Ambientales	Incon: 0.00			

Nota. La figura muestra los valores ingresados a la matriz de comparación, con respecto el objetivo principal, que es seleccionar la ruta eficiente. Elaboración propia.

Con respecto al criterio secundario Criterios Base, se consideró que Longitud y Pendiente Longitudinal poseen el mismo grado de importancia al evaluar los trazos propuestos.

Figura 67

Matriz de comparación de la variable Criterios Base

	Longitud	Pendiente Longitudinal
Longitud		1.0
Pendiente Longitudinal	Incon: 0.00	

Nota. La figura muestra los valores ingresados a la matriz de comparación, con respecto a la variable Criterios Base. Elaboración propia.

Con respecto al criterio secundario Geología, se consideró que Sub-Unidades Geomorfológicas es ligeramente menos importante que Pendientes e igual de importante que Peligros Geológicos. Además, que Pendientes es ligeramente más importante que Peligros Geológicos.

Figura 68

Matriz de comparación de la variable Geología

	Sub-Unidades Geomorgológicas	Pendientes	Peligros Geológicos
Sub-Unidades Geomorgológicas		3.0	1.0
Pendientes			3.0
Peligros Geológicos	Incon: 0.00		

Nota. La figura muestra los valores ingresados a la matriz de comparación, con respecto a la variable Geología. Elaboración propia.

De acuerdo al criterio secundario Puntos de Control, se estableció que Centro Poblado es ligeramente más importante que Comunidades Campesinas y más importante que Predios Rurales. Por otra parte, se consideró Comunidades Campesinas como ligeramente más importante que Predios Rurales.

Figura 69

Matriz de comparación de la variable Puntos de Control

	Centro Poblado	Comunidades Campesinas	Predios Rurales
Centro Poblado			5.0
Comunidades Campesinas			3.0
Predios Rurales	Incon: 0.04		

Nota. La figura muestra los valores ingresados a la matriz de comparación, con respecto a la variable Puntos de Control. Elaboración propia.

Para el criterio Ecosistemas, se consideró Cobertura Vegetal como menos importante que Área Natural Protegida y ligeramente menos importante que Zona de Amortiguamiento. Además, se consideró Área Natural Protegida como ligeramente más importante que Zona de Amortiguamiento.

Figura 70

Matriz de comparación de la variable Ecosistemas

	Cobertura Vegetal	Área Natural Protegida	Zona de Amortiguamiento
Cobertura Vegetal		5.0	3.0
Área Natural Protegida			3.0
Zona de Amortiguamiento	Incon: 0.04		

Nota. La figura muestra los valores ingresados a la matriz de comparación, con respecto a la variable Ecosistemas. Elaboración propia.

Luego, se procedió a completar las matrices de comparación de cada una de los criterios terciarios, los cuales fueron evaluados de la siguiente forma.

- **Longitud:**

Las longitudes de las rutas preliminares propuestas son las que se muestran en la tabla 22.

Tabla 22

Longitudes de los trazos preliminares propuestos

Ruta Propuesta	Longitud (m)
Ruta Propuesta AMC	8,089.56
Línea de Gradiente Op.1	11,787.14
Línea de Gradiente Op.2	11,922.76

Nota. La tabla muestra las longitudes de cada uno de los trazos preliminares que se están evaluando. Elaboración propia.

Se observa que, en función de las longitudes, la primera opción es *Ruta Propuesta AMC*, la segunda *Línea de Gradiente Op.1* y la tercera opción es *Línea de Gradiente Op.2*. Sin embargo, en la práctica *Línea de Gradiente Op.1* y *Línea de Gradiente Op.2*, poseen una distancia muy similar. Estos cuales fueron representados en la matriz de comparación, como se evidencia en la figura 71.

Figura 71

Matriz de comparación de la variable Longitud

	Ruta Propuesta AMC	Línea de Gradiente Op.1	Línea de Gradiente Op.2
Ruta Propuesta AMC		5.0	5.0
Línea de Gradiente Op.1			1.0
Línea de Gradiente Op.2	Incon: 0.00		

Nota. La figura muestra los valores ingresados a la matriz de comparación, con respecto a la variable Longitud. Elaboración propia.

Se interpreta, en función a la variable Longitud: *Ruta Propuesta AMC* es más importante que *Línea de Gradiente Op.1* y que *Línea de Gradiente Op.2*. Además, *Línea de Gradiente Op.1* posee el mismo el mismo grado de importancia que *Línea de Gradiente Op.2*.

Luego, se verificó que la relación de consistencia sea menor que 0.1, lo cual establece una correcta asignación de valores en la matriz de comparación.

- **Pendiente Longitudinal:**

De acuerdo al Manual de Carreteras Diseño Geométrico DG-2018, se debe tener en consideración que la pendiente longitudinal de la ruta preliminar no debe exceder el 10%. De lo contrario, se considera que el movimiento de tierras es excesivo. Por lo tanto, para realizar la comparación de pendientes longitudinales entre las rutas preliminares, fue necesario identificar las variables: longitud recorrida, cota final y cota inicial del caso de estudio.

Se verificó la pendiente longitudinal de la carretera, en función a la fórmula mostrada a continuación.

$$Pendiente\ Longitudinal(\%) = \frac{Cota\ final - Cota\ inicial}{Longitud\ recorrida} \times 100$$

Las cotas de los puntos de inicio y fin de la carretera fueron obtenidas a partir del informe “Estudio de Topografía, Trazo y Diseño Vial” del expediente técnico del proyecto original.

Cota Inicial: 2282.367 msnm

Cota Final: 2758.066 msnm

Por lo tanto, las pendientes longitudinales calculadas para cada una de las propuestas, fueron las siguientes.

Tabla 23

Pendientes Longitudinales de los trazos preliminares propuestos

Ruta Propuesta	Pendiente Longitudinal
Ruta Propuesta AMC	5.88%
Línea de Gradiente Op.1	4.04%
Línea de Gradiente Op.2	3.99%

Nota. La tabla muestra las pendientes longitudinales de cada uno de los trazos preliminares que se están evaluando. Elaboración propia.

Se observa que, en función de las pendientes longitudinales, la primera opción es *Línea de Gradiente Op.2*, la segunda *Línea de Gradiente Op.1* y la tercera opción es *Ruta Propuesta AMC*. Sin embargo, en la práctica *Línea de Gradiente Op.1* y *Línea de Gradiente Op.2*, poseen una pendiente longitudinal muy similar. Como se observa en la figura 72, estos fueron representados en la matriz de comparación,.

Figura 72

Matriz de comparación de la variable Pendiente Longitudinal

	Ruta Propuesta AMC	Línea de Gradiente Op.1	Línea de Gradiente Op.2
Ruta Propuesta AMC			3.0
Línea de Gradiente Op.1			1.0
Línea de Gradiente Op.2	Incon: 0.00		

Nota. La figura muestra los valores ingresados a la matriz de comparación, con respecto a la variable Pendiente Longitudinal. Elaboración propia.

Se interpreta, en función a la variable Pendiente Longitudinal: *Ruta Propuesta AMC* es ligeramente menos importante que *Línea de Gradiente Op.1* y que *Línea de Gradiente Op.2*. Además, *Línea de Gradiente Op.1* posee el mismo el mismo grado de importancia que *Línea de Gradiente Op.2*.

Luego, se verificó que la relación de consistencia sea menor que 0.1, lo cual establece una correcta asignación de valores en la matriz de comparación.

- **Sub-Unidades Geomorfológicas:**

Para comparar los tres trazos propuestos, en función a las Sub-Unidades Geomorfológicas, se realizó una comparación visual de los trazos sobre la capa reclasificada. Ello se realizó, debido a que la capa reclasificada representa visualmente las zonas por donde debería ir o no el trazo propuesto. Por lo tanto, para la comparación, se consideró las zonas rojizas como las menos eficientes para el paso del trazo.

Figura 73

Comparación visual de los trazos sobre la capa Sub-Unidades Geomorfológicas



Nota. La figura muestra los trazos propuestos sobre la capa reclasificada de Sub-Unidades Geomorfológicas. Elaboración propia.

Se observa que, en función de las sub-unidades geomorfológicas, la primera opción es *Línea de Gradiente Op.1*, la segunda *Ruta Propuesta AMC* y la tercera opción es *Línea de Gradiente Op.2*, los cuales fueron representados en la matriz de comparación, como se evidencia en la figura 74.

Figura 74

Matriz de comparación de la variable Sub-Unidades Geomorfológicas

	Ruta Propuesta AMC	Línea de Gradiente Op.1	Línea de Gradiente Op.2
Ruta Propuesta AMC		3.0	5.0
Línea de Gradiente Op.1			7.0
Línea de Gradiente Op.2	Incon: 0.06		

Nota. La figura muestra los valores ingresados a la matriz de comparación, con respecto a la variable Sub-Unidades Geomorfológicas. Elaboración propia.

Se interpreta, en función a la variable Sub-Unidades Geomorfológicas: *Ruta Propuesta AMC* es ligeramente menos importante que *Línea de Gradiente Op.1* y más importante *Línea de Gradiente Op.2*. Además, *Línea de Gradiente Op.1* es mucho más importante que *Línea de Gradiente Op.2*.

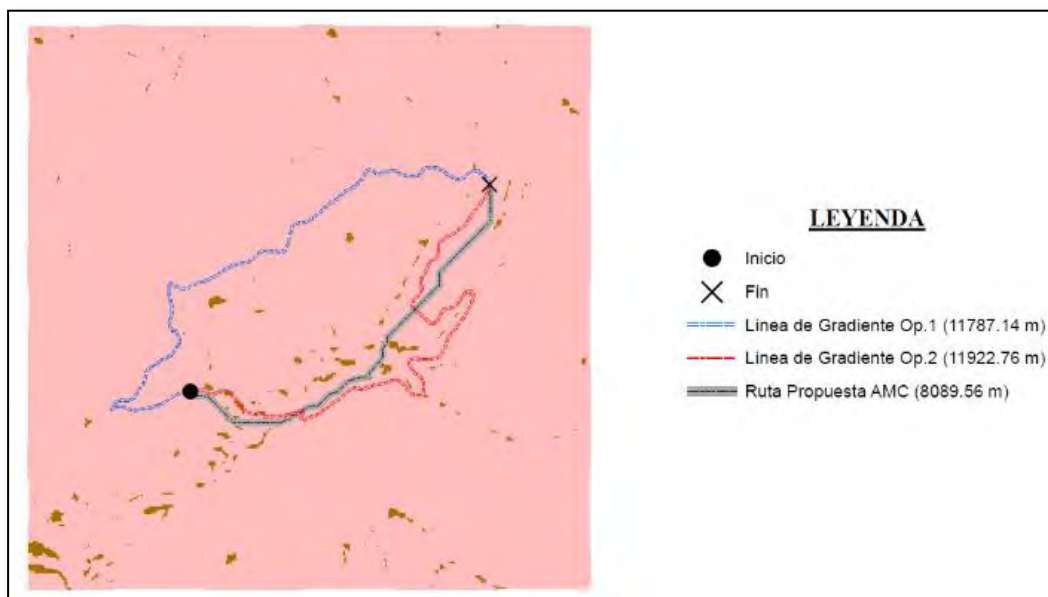
Luego, se verificó que la relación de consistencia sea menor que 0.1, lo cual establece una correcta asignación de valores en la matriz de comparación.

- **Pendientes:**

Para comparar los tres trazos propuestos, en función a las Pendientes, se realizó una comparación visual de los trazos sobre la capa reclasificada, por las razones explicadas anteriormente. Para la comparación, se consideró las zonas rojizas como las menos eficientes para el paso del trazo.

Figura 75

Comparación visual de los trazos sobre la capa Pendientes



Nota. La figura muestra los trazos propuestos sobre la capa reclasificada de Pendientes. Elaboración propia.

Se observa que, en función de las pendientes, la primera opción es *Ruta Propuesta AMC*, la segunda *Línea de Gradiente Op.2* y la tercera opción es *Línea de Gradiente Op.1*, los cuales fueron representados en la matriz de comparación, como se contempla en la imagen 76.

Figura 76

Matriz de comparación de la variable Pendientes

	Ruta Propuesta AMC	Línea de Gradiente Op.1	Línea de Gradiente Op.2
Ruta Propuesta AMC		7.0	3.0
Línea de Gradiente Op.1			5.0
Línea de Gradiente Op.2	Incon: 0.05		

Nota. La figura muestra los valores ingresados a la matriz de comparación, con respecto a la variable Pendientes. Elaboración propia.

Se interpreta, en función a la variable Pendientes: *Ruta Propuesta AMC* es mucho más importante que *Línea de Gradiente Op.1* y ligeramente más importante que *Línea de Gradiente Op.2*. Además, *Línea de Gradiente Op.1* es menos importante que *Línea de Gradiente Op.2*.

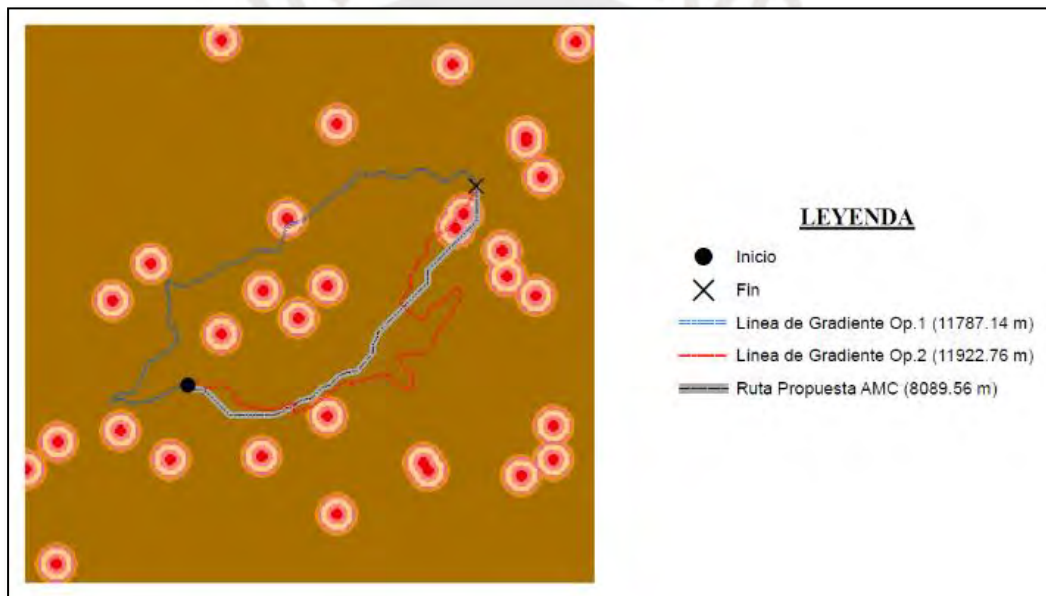
Luego, se verificó que la relación de consistencia sea menor que 0.1, lo cual establece una correcta asignación de valores en la matriz de comparación.

- **Peligros Geológicos:**

Para comparar los tres trazos propuestos, en función a los Peligros Geológicos, se realizó una comparación visual de los trazos sobre la capa reclasificada, por las razones explicadas anteriormente. Para la comparación, se consideró las zonas rojizas como las menos eficientes para el paso del trazo.

Figura 77

Comparación visual de los trazos sobre la capa Peligros Geológicos



Nota. La figura muestra los trazos propuestos sobre la capa reclasificada de Peligros Geológicos. Elaboración propia.

Se observa que, en función de los peligros geológicos, la primera opción es *Ruta Propuesta AMC*, la segunda *Línea de Gradiente Op.2* y la tercera opción es *Línea de Gradiente Op.1*, los cuales fueron representados en la matriz de comparación, como se muestra en la figura 78.

Figura 78

Matriz de comparación de la variable Peligros Geológicos

	Ruta Propuesta AMC	Línea de Gradiente Op.1	Línea de Gradiente Op.2
Ruta Propuesta AMC		5.0	3.0
Línea de Gradiente Op.1			3.0
Línea de Gradiente Op.2	Incon: 0.04		

Nota. La figura muestra los valores ingresados a la matriz de comparación, con respecto a la variable Peligros Geológicos. Elaboración propia.

Se interpreta, en función a la variable Peligros Geológicos: *Ruta Propuesta AMC* es más importante que *Línea de Gradiente Op.1* y ligeramente más importante que *Línea de Gradiente Op.2*. Además, *Línea de Gradiente Op.1* es ligeramente menos importante que *Línea de Gradiente Op.2*.

Luego, se verificó que la relación de consistencia sea menor que 0.1, lo cual establece una correcta asignación de valores en la matriz de comparación.

- **Centro Poblado:**

Para comparar los tres trazos propuestos, en función al casco urbano de la ciudad de Abancay, denominado como Centro Poblado, se realizó una comparación visual de los trazos sobre la capa reclasificada, por las razones explicadas anteriormente. Para la comparación, se consideró las zonas rojizas como las menos eficientes para el paso del trazo.

Figura 79

Comparación visual de los trazos sobre la capa Centro Poblado



Nota. La figura muestra los trazos propuestos sobre la capa reclasificada de Centro Poblado. Elaboración propia.

Se observa que, en función de Centro Poblado, la primera opción es *Línea de Gradiente Op.1*, la segunda *Línea de Gradiente Op.2* y la tercera opción es *Ruta Propuesta AMC*, los cuales fueron representados en la matriz de comparación, como se contempla en la figura 80.

Figura 80

Matriz de comparación de la variable Centro Poblado

	Ruta Propuesta AMC	Línea de Gradiente Op.1	Línea de Gradiente Op.2
Ruta Propuesta AMC		5.0	3.0
Línea de Gradiente Op.1			3.0
Línea de Gradiente Op.2	Incon: 0.04		

Nota. La figura muestra los valores ingresados a la matriz de comparación, con respecto a la variable Centro Poblado. Elaboración propia.

Se interpreta, en función a la variable Centro Poblado: *Ruta Propuesta AMC* es menos importante que *Línea de Gradiente Op.1* y ligeramente menos importante que *Línea de Gradiente Op.2*. Además, *Línea de Gradiente Op.1* es ligeramente más importante que *Línea de Gradiente Op.2*.

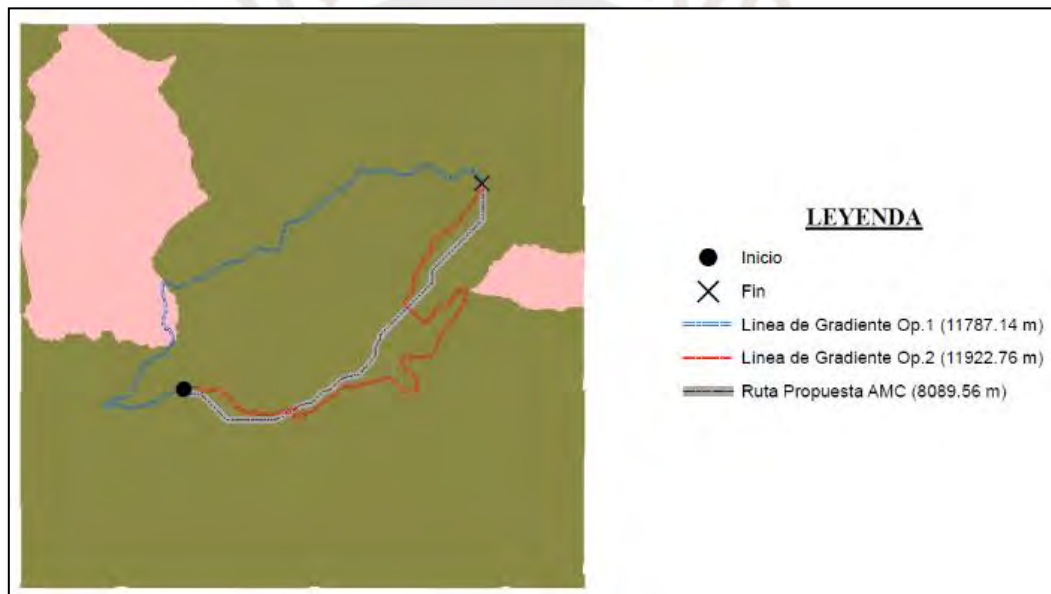
Luego, se verificó que la relación de consistencia sea menor que 0.1, lo cual establece una correcta asignación de valores en la matriz de comparación.

- **Comunidades Campesinas:**

Para comparar los tres trazos propuestos, en función a las Comunidades Campesinas, se realizó una comparación visual de los trazos sobre la capa reclasificada, por las razones explicadas anteriormente. Para la comparación, se consideró las zonas rojizas como las menos eficientes para el paso del trazo.

Figura 81

Comparación visual de los trazos sobre la capa Comunidades Campesinas



Nota. La figura muestra los trazos propuestos sobre la capa reclasificada de Comunidades Campesinas. Elaboración propia.

Se observa que, en función de Comunidades Campesinas, la primera opción es *Ruta Propuesta AMC*, la segunda *Línea de Gradiente Op.2* y la tercera opción es *Línea de Gradiente Op.1*, los cuales fueron representados en la matriz de comparación, como se muestra en la figura 82.

Figura 82

Matriz de comparación de la variable Comunidades Campesinas

	Ruta Propuesta AMC	Línea de Gradiente Op.1	Línea de Gradiente Op.2
Ruta Propuesta AMC		7.0	3.0
Línea de Gradiente Op.1			5.0
Línea de Gradiente Op.2	Incon: 0.06		

Nota. La figura muestra los valores ingresados a la matriz de comparación, con respecto a la variable Comunidades Campesinas. Elaboración propia.

Se interpreta, en función a la variable Comunidades Campesinas: *Ruta Propuesta AMC* es mucho más importante que *Línea de Gradiente Op.1* y ligeramente más importante que *Línea de Gradiente Op.2*. Además, *Línea de Gradiente Op.1* es menos importante que *Línea de Gradiente Op.2*.

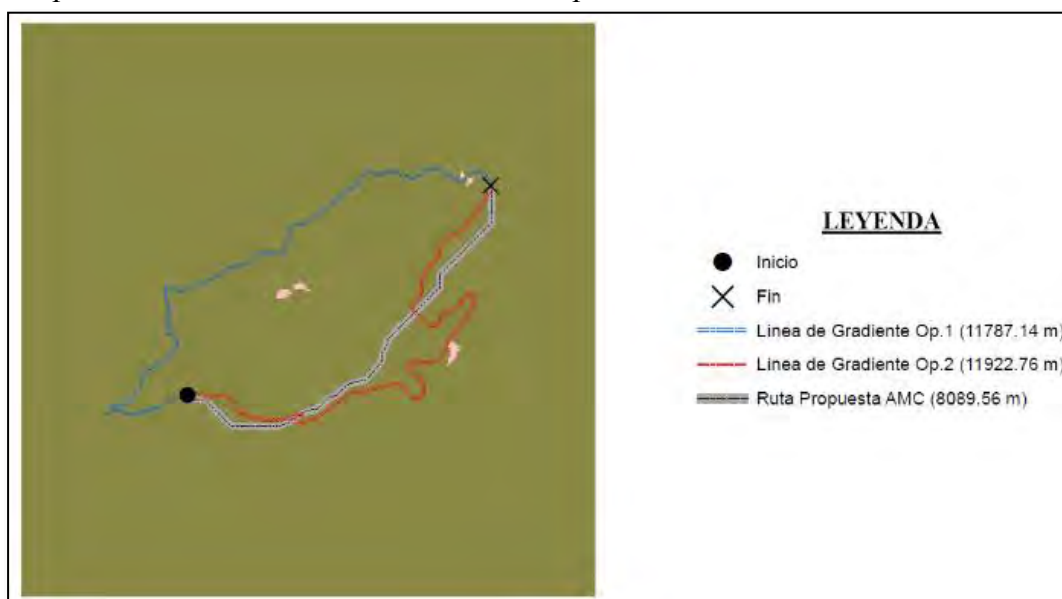
Luego, se verificó que la relación de consistencia sea menor que 0.1, lo cual establece una correcta asignación de valores en la matriz de comparación.

- **Predios Rurales:**

Para comparar los tres trazos propuestos, en función a los Predios Rurales, se realizó una comparación visual de los trazos sobre la capa reclasificada, por las razones explicadas anteriormente. Para la comparación, se consideró las zonas rojizas como las menos eficientes para el paso del trazo.

Figura 83

Comparación visual de los trazos sobre la capa Predios Rurales



Nota. La figura muestra los trazos propuestos sobre la capa reclasificada de Predios Rurales. Elaboración propia.

Se observa que, en función de Predios Rurales, la primera opción es *Ruta Propuesta AMC*, la segunda *Línea de Gradiente Op.2* y la tercera opción es *Línea de Gradiente Op.1*, como se resalta en la imagen 84, los cuales fueron representados en la matriz de comparación.

Figura 84

Matriz de comparación de la variable Predios Rurales

	Ruta Propuesta AMC	Línea de Gradiente Op.1	Línea de Gradiente Op.2
Ruta Propuesta AMC		5.0	3.0
Línea de Gradiente Op.1			3.0
Línea de Gradiente Op.2	Incon: 0.04		

Nota. La figura muestra los valores ingresados a la matriz de comparación, con respecto a la variable Predios Rurales. Elaboración propia.

Se interpreta, en función a la variable Predios Rurales: *Ruta Propuesta AMC* es más importante que *Línea de Gradiente Op.1* y ligeramente más importante que *Línea de Gradiente Op.2*. Además, *Línea de Gradiente Op.1* es ligeramente menos importante que *Línea de Gradiente Op.2*.

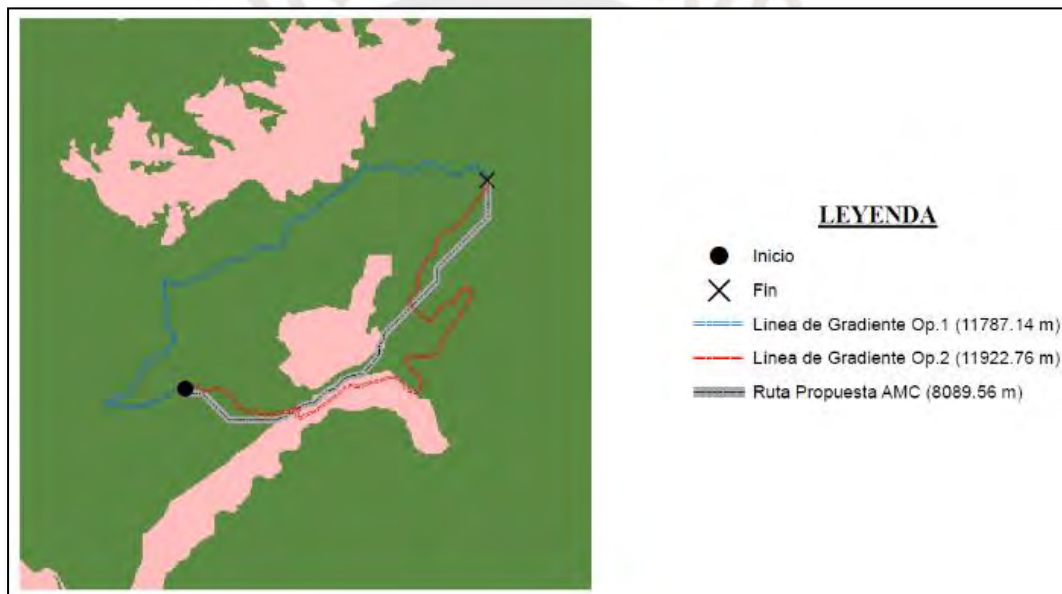
Luego, se verificó que la relación de consistencia sea menor que 0.1, lo cual establece una correcta asignación de valores en la matriz de comparación.

- **Cobertura Vegetal:**

Para comparar los tres trazos propuestos, en función a la Cobertura Vegetal, se realizó una comparación visual de los trazos sobre la capa reclasificada, por las razones explicadas anteriormente. Para la comparación, se consideró las zonas rojizas como las menos eficientes para el paso del trazo.

Figura 85

Comparación visual de los trazos sobre la capa Cobertura Vegetal



Nota. La figura muestra los trazos propuestos sobre la capa reclasificada de Cobertura Vegetal. Elaboración propia.

Se observa que, en función de la Cobertura Vegetal, la primera opción es *Línea de Gradiente Op.1*, la segunda *Ruta Propuesta AMC* y la tercera opción es *Línea de Gradiente Op.2*, los cuales fueron representados en la matriz de comparación, como se muestra en la figura 86.

Figura 86

Matriz de comparación de la variable Cobertura Vegetal

	Ruta Propuesta AMC	Línea de Gradiente Op.1	Línea de Gradiente Op.2
Ruta Propuesta AMC		3.0	3.0
Línea de Gradiente Op.1			5.0
Línea de Gradiente Op.2	Incon: 0.04		

Nota. La figura muestra los valores ingresados a la matriz de comparación, con respecto a la variable Cobertura Vegetal. Elaboración propia.

Se interpreta, en función a la variable Cobertura Vegetal: *Ruta Propuesta AMC* es ligeramente menos importante que *Línea de Gradiente Op.1* y ligeramente más importante que *Línea de Gradiente Op.2*. Además, *Línea de Gradiente Op.1* es más importante que *Línea de Gradiente Op.2*.

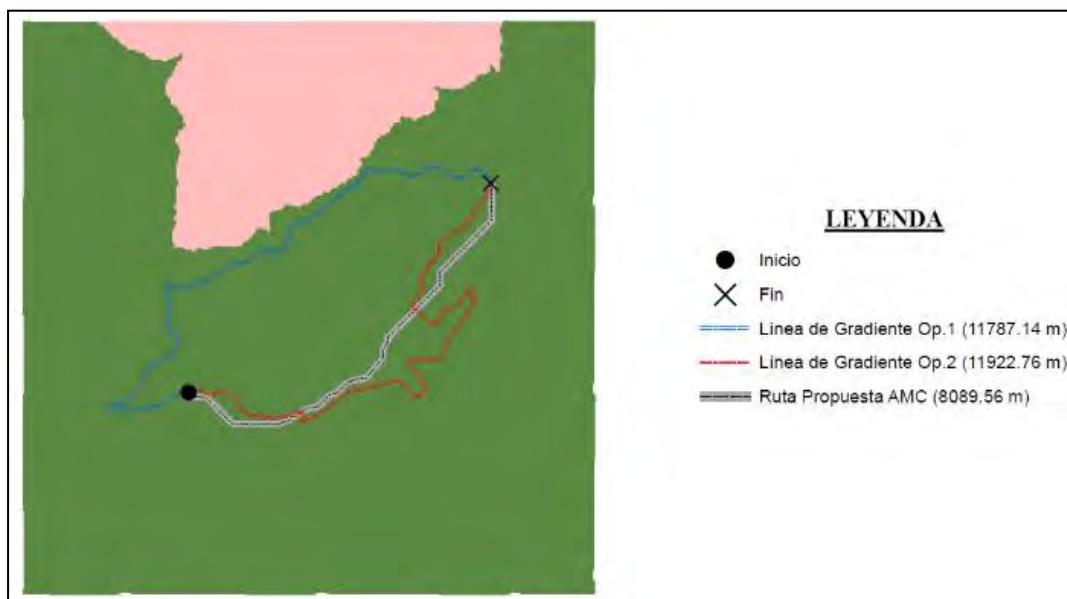
Luego, se verificó que la relación de consistencia sea menor que 0.1, lo cual establece una correcta asignación de valores en la matriz de comparación.

- **Área Natural Protegida:**

Para comparar los tres trazos propuestos, en función al Área Natural Protegida, se realizó una comparación visual de los trazos sobre la capa reclasificada, por las razones explicadas anteriormente. Para la comparación, se consideró las zonas rojizas como las menos eficientes para el paso del trazo.

Figura 87

Comparación visual de los trazos sobre la capa Área Natural Protegida



Nota. La figura muestra los trazos propuestos sobre la capa reclasificada de Área Natural Protegida. Elaboración propia.

Se observa que, en función del Área Natural Protegida, la primera opción es *Ruta Propuesta AMC*, la segunda *Línea de Gradiente Op.2* y la tercera opción es *Línea de Gradiente Op.1*. Sin embargo, para la presente capa, se observa que *Ruta Propuesta AMC* y *Línea de Gradiente Op.2*, tienen las mismas características, en cuanto a distancia de la zona rojiza. Como se resalta en la figura 88, estos fueron representados en la matriz de comparación.

Figura 88

Matriz de comparación de la variable Área Natural Protegida

	Ruta Propuesta AMC	Línea de Gradiente Op.1	Línea de Gradiente Op.2
Ruta Propuesta AMC		5.0	1.0
Línea de Gradiente Op.1			5.0
Línea de Gradiente Op.2	Incon: 0.00		

Nota. La figura muestra los valores ingresados a la matriz de comparación, con respecto a la variable Área Natural Protegida. Elaboración propia.

Se interpreta, en función a la variable Área Natural Protegida: *Ruta Propuesta AMC* es más importante que *Línea de Gradiente Op.1* y de igual importancia que *Línea de*

Gradiente Op.2. Además, *Línea de Gradiente Op.1* es menos importante que *Línea de Gradiente Op.2.*

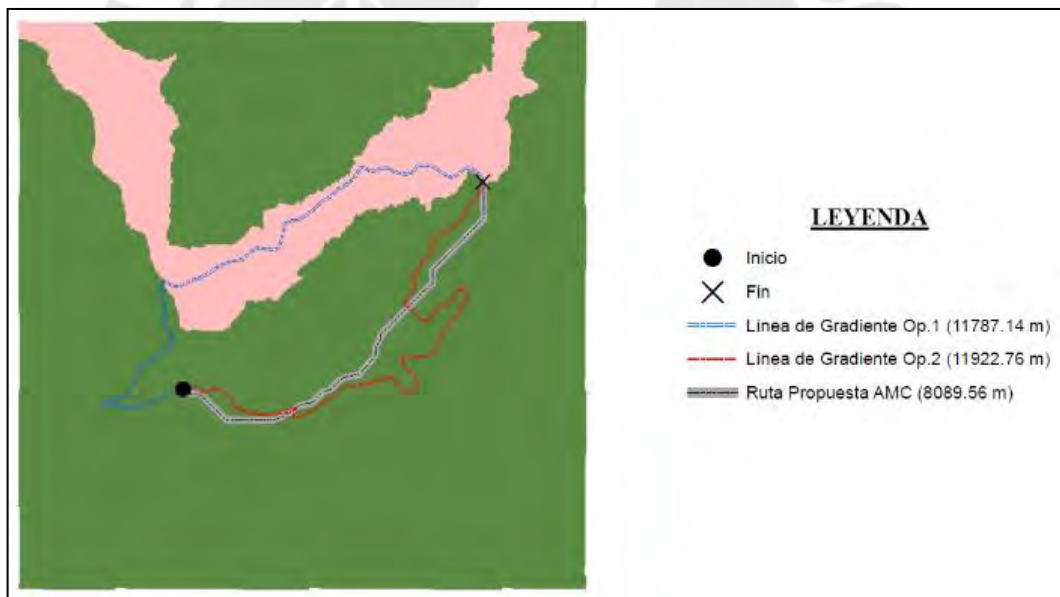
Luego, se verificó que la relación de consistencia sea menor que 0.1, lo cual establece una correcta asignación de valores en la matriz de comparación.

- **Zona de Amortiguamiento:**

Para comparar los tres trazos propuestos, en función a la Zona de Amortiguamiento, se realizó una comparación visual de los trazos sobre la capa reclasificada, por las razones explicadas anteriormente. Para la comparación, se consideró las zonas rojizas como las menos eficientes para el paso del trazo.

Figura 89

Comparación visual de los trazos sobre la capa Zona de Amortiguamiento



Nota. La figura muestra los trazos propuestos sobre la capa reclasificada de Zona de Amortiguamiento. Elaboración propia.

Se observa que, en función de la Zona de Amortiguamiento, la primera opción es *Ruta Propuesta AMC*, la segunda *Línea de Gradiente Op.2* y la tercera opción es *Línea de Gradiente Op.1*. Sin embargo, para la presente capa, se observa que *Ruta Propuesta AMC* y *Línea de Gradiente Op.2*, tienen las mismas características, en cuanto a

distancia de la zona rojiza. Estos fueron representados en la matriz de comparación, como se muestra en la figura 90.

Figura 90

Matriz de comparación de la variable Zona de Amortiguamiento

	Ruta Propuesta AMC	Línea de Gradiente Op.1	Línea de Gradiente Op.2
Ruta Propuesta AMC		7.0	1.0
Línea de Gradiente Op.1			7.0
Línea de Gradiente Op.2	Incon: 0.00		

Nota. La figura muestra los valores ingresados a la matriz de comparación, con respecto a la variable Zona de Amortiguamiento. Elaboración propia.

Se interpreta, en función a la variable Zona de Amortiguamiento: *Ruta Propuesta AMC* es mucho más importante que *Línea de Gradiente Op.1* y de igual importancia que *Línea de Gradiente Op.2*. Además, *Línea de Gradiente Op.1* es mucho menos importante que *Línea de Gradiente Op.2*.

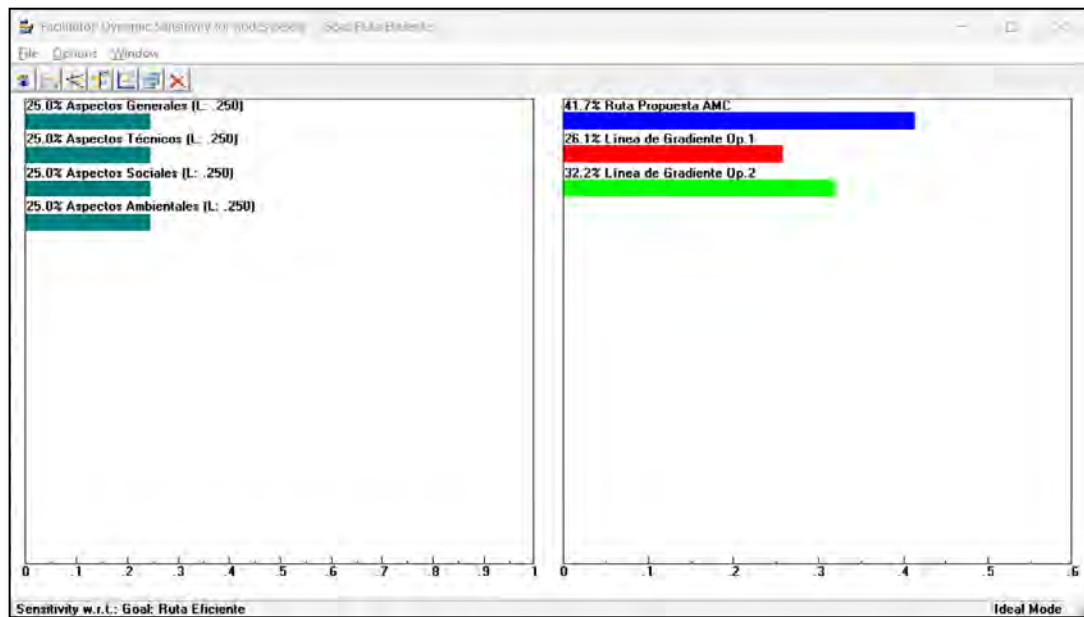
Luego, se verificó que la relación de consistencia sea menor que 0.1, lo cual establece una correcta asignación de valores en la matriz de comparación.

Finalmente, luego de haber completado las matrices de comparación de todos los criterios y verificar que la relación de consistencia es menor que 0.1, en todos los casos, se desplegaron los gráficos dinámico sensitivo y de rendimiento sensitivo, los cuales muestran los resultados finales que señalan los trazos propuestos más convenientes para el presente caso de estudio.

➤ Gráfico de Sensibilidad Dinámica

El gráfico de Sensibilidad Dinámica, permite analizar cómo evolucionan las preferencias entre las opciones a medida que se aumenta o disminuye el grado de importancia de los criterios primarios (Aspectos Generales, Aspectos Técnicos, Aspectos Sociales y Aspectos Ambientales). En el presente caso de estudio, luego de realizar el método AHP en Expert Choice 11, se obtuvo el siguiente resultado.

Figura 91
Gráfico de Sensibilidad Dinámica final



Nota. La figura muestra el gráfico de sensibilidad dinámica, que da como resultado la preferencia que existe entre los trazos evaluados. Elaboración propia.

A partir del gráfico de sensibilidad dinámica, se interpreta lo siguiente:

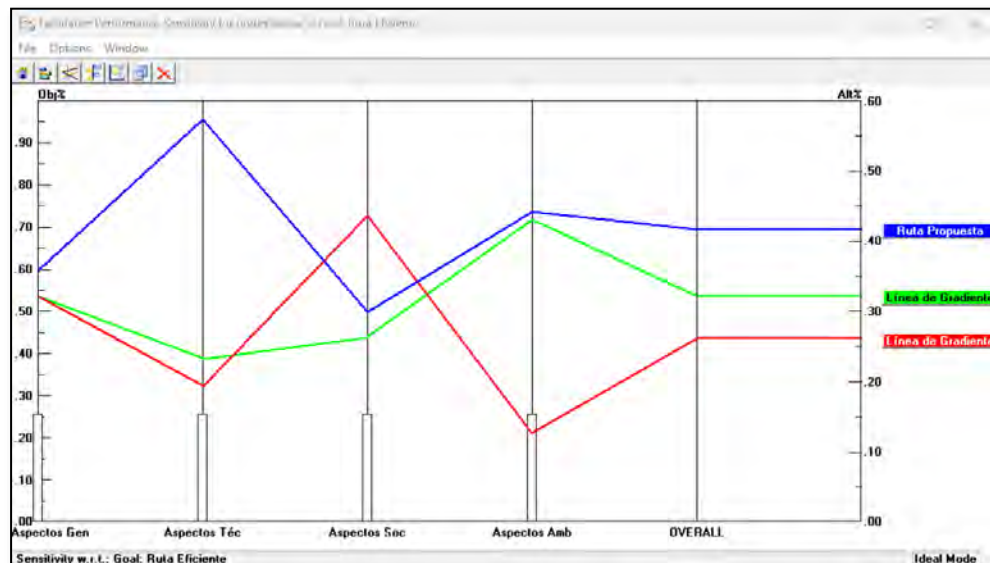
Ruta Propuesta posee una preferencia de 41.7%, *Línea de Gradiente Op.1* tiene una preferencia de 26.1% y *Línea de Gradiente Op.2* posee un 32.2% de preferencia. Siempre y cuando se consideren los criterios primarios con el mismo grado de importancia. Por lo tanto, se concluye, que, de los 3 trazos propuestos, el más conveniente, según los criterios establecidos, es el trazo denominado *Ruta Propuesta AMC*, seguido de *Línea de Gradiente Op.2* y de *Línea de Gradiente Op.1*.

➤ Gráfico de Sensibilidad de Rendimiento

El gráfico de Sensibilidad de Rendimiento, revela el desempeño de los trazos evaluados para cada uno de los criterios primarios. Además, señala el rendimiento de las opciones de forma global, es decir, considerando el objetivo, que es determinar la ruta eficiente en función de los criterios establecidos.

Figura 92

Gráfico de Sensibilidad de Rendimiento final



Nota. La figura muestra el gráfico de sensibilidad de rendimiento, que da como resultado la preferencia que existe entre los trazos evaluados para cada uno de los criterios primarios, y también para el objetivo del proceso de análisis jerárquico. Elaboración propia.

A partir del gráfico de sensibilidad de rendimiento, se interpreta lo siguiente:

Las barras verticales, que se encuentra sobre los criterios primarios, señalan que se les ha dado el mismo grado de importancia entre las alternativas evaluadas. Por otra parte, la intersección de cada línea de color (azul, verde y rojo) con la línea vertical que se encuentra sobre cada criterio primario, señala la preferencia que tuvo cada alternativa evaluada para cada criterio primario. Por ejemplo, se observa que para los criterios Aspectos Generales, Aspectos Técnicos y Aspectos Ambientales, la *Ruta Propuesta AMC* posee una mayor preferencia. Sin embargo, para el criterio Aspectos Sociales, *Línea de Gradiente Op.1* posee mayor preferencia que los otros dos trazos propuestos.

Pero cuando se consideran todos los criterios primarios, se observa que, efectivamente, *Ruta Propuesta AMC* es más eficiente, en función a los criterios establecidos, que *Línea de Gradiente Op.2*, seguido de *Línea de Gradiente Op.1*.

Por lo tanto, luego de haber realizado el método AHP en Expert Choice 11, en el cual se evaluaron las propuestas, se concluyó que, en función de los criterios establecidos para el análisis, la ruta propuesta mediante el método AMC, aplicado en ArcMap (aplicativo de ArcGIS), es a más eficiente que las otras dos propuestas obtenidas mediante el Método de la Línea de Gradiente, aplicado en Civil3D.

5.2.Comparación a Juicio de Expertos

Luego de obtener los resultados en obtenidos en los capítulos *4.1. Método de Análisis Multicriterio Aplicado en ArcGIS para Determinar el Trazo Preliminar de la Vía de Evitamiento de la Ciudad de Abancay*, *4.2. Método de la Línea de Gradiente Aplicado en Civil3D para Determinar el Trazo Preliminar de la Vía de Evitamiento de la Ciudad de Abancay* y haber realizado la comparación de propuestas mediante el método AHP en el capítulo *5.1. Proceso de Análisis Jerárquico (AHP) en Expert Choice 11*, se elaboraron los planos que se muestran en el Anexo N° 14 y el Anexo N° 15.

Los planos fueron entregados a los cuatro ingenieros civiles partícipes en obras de infraestructura vial, cumpliendo roles de residentes de obra y también de supervisión en los diferentes proyectos de los que formaron parte. Además, cada uno de ellos fueron partícipes de una presentación realizada, en la cual se abordaron los temas tratados en el presente trabajo de tesis.

En resumen, los cuatro ingenieros confirman que existen beneficios al realizar el método de análisis multicriterio, aplicado en el software ArcGIS. Esto se debe a que consideran que es un método que tiene mayores datos de entrada. Por tal motivo, uno de los comentarios afirma que, en sí, es un método ventajoso frente al método de la línea de gradiente. Sin embargo, no consideran que esté mal aplicarlo, porque puede llegar a prevenir correcciones

durante las etapas de diseños definitivos e inclusive durante la ejecución de un proyecto de infraestructura vial.

Por lo tanto, se concluye que la alternativa propuesta, denominada como *Ruta Propuesta AMC* será una opción más ventajosa que las alterativas *Línea de Gradiente Op.1* y *Línea de Gradiente Op.2*. Conclusión, a la que se llega en base a los comentarios positivos sobre el método propuesto, por parte del juicio de los expertos. Comentarios que se encuentran adjuntos en el Anexo N°16.



Capítulo VI: Conclusiones y Recomendaciones

6.1. Conclusiones

- Se logra identificar los problemas que han contribuido al retraso en la ejecución de la Vía de Evitamiento de la Ciudad de Abancay. Entre estos problemas se incluyen cuestiones como el saneamiento de terrenos, interferencias y la ubicación incorrecta de botaderos de desmonte, entre otros inconvenientes. Estos problemas podrían haberse evitado si se hubieran abordado adecuadamente desde las etapas de planificación y diseño. Como resultado, a pesar de que la obra comenzó el 21 de abril del 2021 y originalmente tenía previsto terminar en febrero de 2022, con un plazo de 360 días calendario, en junio de 2023 solo se ha completado el 33% de la obra, lo que pone de manifiesto la falta de eficiencia en la planificación del proyecto.
- Los criterios técnicos, sociales y ambientales, considerados como criterios primarios, se describen a través de subcriterios, denominados criterios secundarios y terciarios. Los criterios terciarios se definieron en capas (en formato vectorial o ráster) que contienen información georreferenciada. Por lo tanto, cada capa proporcionó diferentes tipos de información que los describen, lo que permitió seleccionar cuál de estas informaciones utilizar, es decir, se parametrizaron según las necesidades del caso de estudio.
- Se concluye que las capas utilizadas en ArcMap, al estar georreferenciadas, logran una caracterización geográfica y descriptiva de la zona del caso de estudio. Esta capacidad de proporcionar información detallada y su integración, basada en datos parametrizados, contribuyeron a obtener un trazo preliminar propuesto de manera más objetiva mediante el método AMC. Este método se aplicó utilizando ArcMap, que es un aplicativo del software ArcGIS.
- La ruta obtenida por el método AMC en ArcGIS, es el resultado de la integración de cada una de las capas trabajadas. Lo cual se logró tras haber realizado un proceso de análisis

jerárquico, que permitió superponer las capas considerando la relevancia o porcentaje de participación de cada una. Resultando ventajoso, debido a que permite obtener el trazo preliminar de la carretera, considerando diferentes criterios en función a las necesidades o particularidades del proyecto.

- El aplicativo ArcMap, del software ArcGIS, permite complementar los trabajos durante la etapa de planificación en softwares como AutoCAD y Civil3D, debido a la posibilidad de exportar datos (archivos y capas) georreferenciados. Permitiendo el uso de estos en otros softwares, de acuerdo a la conveniencia del proyectista.
- A comparación del método propuesto, el método de la línea de gradiente se realiza por medio de un proceso que es simple, debido a que busca mantener una pendiente longitudinal constante de la ruta. No obstante, su complejidad aumenta cuando se busca obtener otras alternativas ante eventuales replanteos que se puedan presentar en las diferentes etapas del proyecto.
- El método de la línea de gradiente, permite obtener un trazo de la ruta preliminar de la carretera con pendiente longitudinal constante, con el objetivo de que, al coincidir el eje final con el trazo, los movimientos de tierras a ser ejecutados sean mínimos. Sin embargo, el método propuesto, permite delimitar las pendientes por las cuales se desea pase el trazo preliminar, resultando ventajoso.
- La cantidad de información requerida con el método propuesto es superior con respecto al método de la línea de gradiente. Sin embargo, luego de automatizar los procesos, el método propuesto permite flexibilizar la búsqueda de nuevas soluciones ante eventuales cambios que se puedan suscitar durante la planificación o ejecución del proyecto.
- La posibilidad de automatizar los procesos en ArcGIS, permite encontrar diferentes soluciones, considerando múltiples criterios de forma simultánea. Y así tener alternativas

diferentes ante eventualidades que conlleven a algún cambio o replanteo durante la etapa de planificación del proyecto.

- Considerando los aspectos generales, técnicos, sociales y ambientales, con la misma relevancia durante la etapa de planificación del caso de estudio, se concluye que, de las tres propuestas presentadas, la más conveniente es la resultante del método de análisis multicriterio aplicado en ArcGIS. Se llegó a dicha conclusión luego de realizar el método AHP en Expert Choice 11, que permitió discernir la mejor de las alternativas evaluadas en función a los criterios establecidos y de forma menos subjetiva.
- Considerando el juicio de los expertos y los comentarios proporcionados (Anexo N° 16), se concluye que el método AMC aplicado en ArcGIS, es muy beneficioso al tener mayores consideraciones con los datos de entrada, pudiendo prever incidentes que puedan suceder durante los diseños a nivel de detalle o durante la ejecución. En consecuencia, se evitaría problemas de replanteo en los planos o de retrabajos durante la ejecución de un proyecto de infraestructura vial, como el mencionado en el caso de estudio.

6.2.Comentarios y Recomendaciones

- Con el fin de obtener resultados objetivos y confiables, se recomienda la participación de un comité de especialistas, de las diferentes áreas del proyecto, durante la etapa de planificación. Ello debido a las particularidades que puede poseer, además permitirá obtener mejores resultados durante la aplicación del método de análisis multicriterio y proceso de análisis jerárquico. Por otra parte, se recomienda que los especialistas trabajen de forma integral, es decir, por medio de sesiones participativas en las que complementen ideas y opiniones para establecer criterios adecuados en el proyecto.
- Se recomienda que las capas usadas en ArcGIS, para emplear el método AMC, sean provenientes de fuentes confiables y las más actuales posibles. Además, de que la información que contengan, pueda ser verificada en campo, yendo a la zona de estudio

donde se plantea realizar el proyecto. Ello, con el objetivo de evitar problemas o retrasos, debido a algún elemento del cual no se tenga registro en las capas obtenidas.

- La participación ciudadana es muy importante para cualquier tipo de proyecto de infraestructura que los afecte directa o indirectamente. Por lo tanto, es recomendable que representantes de las zonas que serán afectadas, participen durante las etapas iniciales del proyecto, con el fin de evitar posibles conflictos de carácter social que puedan llevar al retraso durante la ejecución de la obra. Esta participación no podrá ser en cuestiones técnicas, pero sí mediante opiniones o sugerencias que permitan a los especialistas tomar decisiones más sensatas.
- En cuanto al uso del software ArcGIS en la fase de planificación, se sugiere contar con un profesional con experiencia en sistemas de información geográfica que esté familiarizado con el software. Esto facilitará la creación eficiente de la ruta preliminar y ayudará a evitar problemas durante su desarrollo. Además, es recomendable que participe en las reuniones con los diversos especialistas del proyecto para aplicar las decisiones tomadas de manera efectiva.
- Como se detalló en las conclusiones, el aplicativo ArcMap permite exportar archivos a Civil3D y otros softwares. Por lo tanto, la ruta preliminar hallada por el método propuesto, puede ser exportada con distintos fines que resulten ventajosos, como los que se mencionan a continuación:
 - o Comparar el trazo propuesto con el obtenido mediante el método de la línea de gradiente.
 - o Usar el trazo propuesto como referencial para aplicar el método de la línea de gradiente. Con ello se estaría contemplando los mismos criterios que en el método propuesto.

- En función al punto anterior, también se podría exportar la capa de superposición ponderada de rásteres reclasificados, el cual puede ser usado como referencia para la aplicación del método de la línea de gradiente, pues delimita y restringe áreas por donde debería pasar la ruta, en función a los criterios establecidos inicialmente en el método propuesto.



Referencias Bibliográficas

- Aguarón, J., & Moreno-Jiménez, J. M. (2003). The geometric consistency index: Approximated thresholds. *European journal of operational research*, 147(1), 137-145. Recuperado el 2021, de [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(02\)00255-2](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(02)00255-2)
- Arancibia Carbajal, S., & Contreras Villablanca, E. (2016). *Evaluación multicriterio y su aplicabilidad en la evaluación de proyectos públicos*. XXI Congreso Internacional del CLAD sobre la Reforma del Estado y de la Administración Pública.
- ArcGIS Enterprise. (s.f.). *Preparar los datos para una superposición ponderada*. Recuperado el 2021, de <https://enterprise.arcgis.com/es/portal/10.6/use/prepare-your-data.htm>
- ArcGIS for Desktop. (s.f.). *¿Qué son los datos ráster?* Recuperado el 2021, de <https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/manage-data/raster-and-images/what-is-raster-data.htm>
- Cárdenas Grisales, J. (2015). *Diseño geométrico de carreteras*. Ecoe ediciones.
- Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres. (2019). *Manual para la evaluación de riesgo originado por fenómenos naturales v3.0*. Recuperado el 2021, de http://cenepred.gob.pe/web/wp-content/uploads/Guia_Manuales/Borrador%20EVAR%20V3/MANUAL_EVARv3-PRE.pdf
- Chaski. (s.f.). *Construcción Vía de Evitamiento de Abancay está paralizada*. Recuperado el 2021, de <https://www.chaski.pe/detalle/construccion-via-de-evitamiento-de-abancay-esta-paralizada-3616>
- CIP Trujillo. (s.f.). *Saneamiento físico legal de predios rurales*. Recuperado el 2021, de <http://www.cip-trujillo.org/subir/uploads/Expo%20PREDIO%20RURALES.pdf>
- Dávila Martínez, F. J. (s.f.). *Introducción a los Sistemas de Información Geográfica*. Recuperado el 2021, de actualidadambiental.pe/wp-content/uploads/2013/10/Rol-del-Sernanp-en-el-proceso-de-certificación-ambiental-Pedro-Gamboa.pdf
- Domínguez Bravo, J. (2000). *Breve introducción a la cartografía y a los sistemas de información geográfica (SIG)*. Ciemat.
- ECOSCRIPT. (s.f.). *Vector vs Raster: ¿Cuál es la diferencia entre estos tipos o formatos de datos espaciales GIS?* Recuperado el 2021, de <https://ecoscript.org/vectorvsraster/>

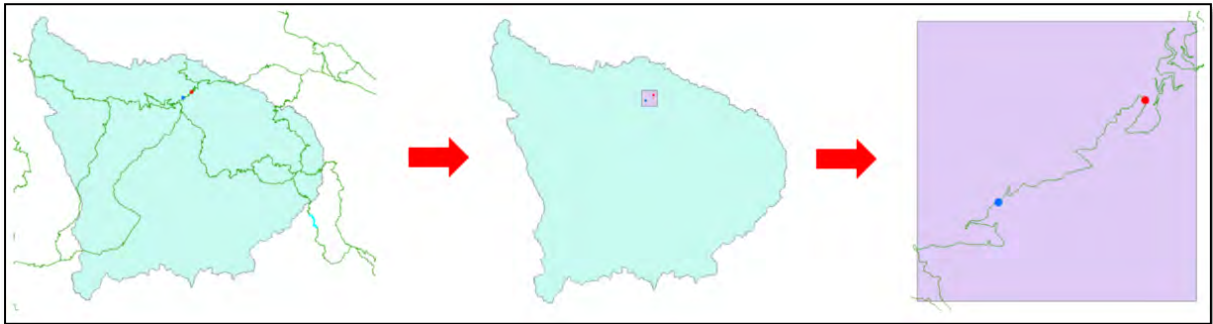
- EcuRed. (s.f.). *Análisis Multicriterio*. Recuperado el 2021, de https://www.ecured.cu/An%C3%A1lisis_multicriterio
- Effat, H. A., & Hassan, O. A. (2013). Designing and evaluation of three alternatives highway routes using the Analytical Hierarchy Process and the least-cost path analysis, application in Sinai Peninsula, Egypt. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 16(2), 141-151. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2013.08.001>
- El Comercio. (2019). *Apurímac: vecinos impiden paso de vehículos en Vía de Evitamiento*. Recuperado el 2021, de <https://elcomercio.pe/peru/apurimac/apurimac-vecinos-impiden-paso-vehiculos-via-evitamiento-fotos-noticia-665477-noticia/>
- esri. (s.f.). *¿Qué son los SIG?* Recuperado el 2021, de <https://www.esri.com/es-es/what-is-gis/overview>
- esri Chile. (s.f.). *ArcGIS Desktop*. Recuperado el 2021, de <https://www.esri.cl/es-cl/productos/arcgis-desktop/overview#:~:text=ArcGIS%20Desktop%20es%20la%20base,an%C3%A1lisis%20espacial%20y%20administrar%20datos.>
- esri. (s.f.). *Coste de distancia*. Recuperado el 2021, de ArcGIS Desktop: <https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/latest/tools/spatial-analyst-toolbox/cost-distance.htm>
- esri. (s.f.). *GIS Dictionary*. Recuperado el 2021, de <https://support.esri.com/en-us/gis-dictionary/search?q=vector>
- esri. (s.f.). *Ruta de coste*. Recuperado el 2021, de ArcGIS Desktop: <https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/latest/tools/spatial-analyst-toolbox/cost-path.htm>
- Fülöp, J. (2005). *Introduction to Decision Making Methods*. Laboratory of Operations Research and Decision Systems, Computer and Automation Institute, Hungarian Academy of Sciences.
- Harris, R. (1998). *Introduction to Decision Making*. Recuperado el 2021, de <http://www.virtualsalt.com/crebook5.htm>
- Hayashi, A., & Morisugi, H. (2000). International comparison of background concept and methodology of transportation project appraisal. *Transport Policy*, 7(1), 73-88. doi:[https://doi.org/10.1016/S0967-070X\(00\)00015-9](https://doi.org/10.1016/S0967-070X(00)00015-9)

- Instituto Nacional de Estadística e Informática. (1996). *1.4 Apurímac: Aspectos Geográficos y Políticos Administrativos*. Recuperado el 2021, de <http://proyectos.inei.gov.pe/web/biblioineipub/bancopub/Est/Lib0253/cap01-04.HTM>
- Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico. (2021). *Los peligros geológicos en Perú*. Lima. Recuperado el 2021, de https://repositorio.ingemmet.gob.pe/bitstream/20.500.12544/3083/8/2021-Los_peligros_geologicos_Peru.pdf
- Instituto Nacional de Estadística e Informática. (2015). *Perú - Bolivia Perfil sociodemográfico y económico de los distritos y municipios fronterizos*. Recuperado el 2021, de https://www.inei.gov.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1383/anexo02.pdf
- Instituto Nacional de Estadística e Informática. (22 de Octubre de 2018). *Censos Nacionales 2017: XII de Población, VII de Vivienda y III de Comunidades Indígenas*. Recuperado el 2021, de <https://censo2017.inei.gov.pe/poblacion-del-departamento-de-apurimac-totalizo-405-mil-759-personas-al-2017/#:~:text=Seg%C3%BAn%20los%20resultados%20de%20los,35%20mil%20382%20son%20mujeres.>
- López Lara, E., Posada Simeón, C., & Moreno Navarro, J. G. (1998). Los Sistemas de Información Geográfica. *Rodríguez García, J. y Collado Machuca, JC (eds.). Andalucía en el umbral del Siglo XXI. Congreso de Ciencia Regional de Andalucía, (1. 1997. Jerez de la Frontera), 789-804*. Universidad de Cádiz.
- Ludeña, W., & Rodríguez Rivero, L. (2010). *Arquitecturas Confrontacionales: Seminario 2005*. Lima: Fondo Editorial PUCP.
- Medina, B. M., & García, M. R. (2016). Aplicación de métodos de decisión multicriterio discretos al análisis de alternativas en estudios informativos de infraestructuras de transporte. *Pensamiento matemático*, 6(2), 27-45. Obtenido de <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/5998856.pdf>
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones - MTC. (2018). *Manual de Carreteras Diseño Geométrico DG-2018*.
- Ministerio del Ambiente. (13 de junio de 2019). *Pérdida de la cobertura vegetal en ecosistemas costeros y andinos*. Recuperado el 2021, de <https://sinia.minam.gob.pe/indicadores/perdida-cobertura-vegetal-ecosistemas-costeros->

- Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú. (s.f.). *Mapa Climático del Perú*.
Obtenido de <https://www.senamhi.gob.pe/?p=mapa-climatico-del-peru>
- Tejero Aranda, M. (2015). *Estudio Comparativo de Modelos de Toma de Decisión Multicriterio para la Selección del Trazado de una Vía*. Trabajo Fin de Máster, Universidad de Jaén, Máster en Ingeniería del Transporte Terrestre y Logística. Recuperado el 2021, de <https://sinbad2.ujaen.es/sites/default/files/publications/PFM%20ESTUDIO%20COMPARATIVO%20DE%20MODELOS%20DE%20TOMA%20.pdf>
- Tischler, S. (2017). Finding the right way-a new approach for route selection procedures? *Transportation Research Procedia*, 25, 2809-2823.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.trpro.2017.05.247>
- Urošević, B. G., & Marinović, B. (2021). Ranking construction of small hydro power plants using multi-criteria decision analysis. *Renewable Energy*, 172, 1174-1183.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.03.115>
- VERA & MORENO S.A. (Diciembre de 2016). *ESTUDIO DEFINITIVO PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LA VÍA DE EVITAMIENTO DE LA CIUDAD DE ABANCAY - MEMORIA DESCRIPTIVA*. Recuperado el 2021, de http://gis.proviasnac.gob.pe/expedientes/2019/LPI_0004_2019/ExpedienteTecnico/01%20Memoria%20Descriptiva.pdf
- Zhao, L., Liu, Z., & Mbachu, J. (2019). Highway Alignment Optimization: An Integrated BIM and GIS Approach. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 8(4), 172.
doi:<https://doi.org/10.3390/ijgi8040172>
- Zopounidis, C., & Doumpos, M. (2017). *Multiple Criteria Decision Making Applications in Management and Engineering*. Springer. Recuperado el 2021

Anexo N°1: Delimitación de la Zona de Influencia para la Ruta Propuesta

Proceso de delimitación de la zona de influencia del caso de estudio, donde se muestra que se realiza en función a los puntos de inicio y fin de la vía establecidos en el expediente técnico correspondiente.



Anexo N°2: Campos Seleccionados en las Tabla de Atributos de Cada Capa

Participante

- Capa: Sub-Unidades Geomorfológicas, Campo: sub_uni

SubUn_Geomorf						
FID	Shape *	OBJECTID	sub_uni	Shape_Leng	Shape_Area	
0	Polygon ZM	1	Cauce del río	2235.221052	53681.6809	
1	Polygon ZM	2	Montaña en roca intrusiva	24124.890086	7388087.58769	
2	Polygon ZM	3	Montaña en roca metamórfica	37820.969756	29920568.1102	
3	Polygon ZM	4	Montaña en roca sedimentaria	50669.529789	17527728.0762	
4	Polygon ZM	5	Montaña en roca volcánico-sedimentaria	32361.335731	7019747.23602	
5	Polygon ZM	6	Montaña estructural en roca sedimentaria	21861.178228	7605385.44789	
6	Polygon ZM	7	Morrenas	5881.332873	1562127.67365	
7	Polygon ZM	8	Terraza aluvial	3307.19692	86933.209123	
8	Polygon ZM	9	Vertiente coluvial de detritos	3341.919312	161145.766626	
9	Polygon ZM	10	Vertiente glacio-fluvial	1454.515819	58062.369871	
10	Polygon ZM	11	Vertiente o piedemonte aluvio-torrencial	58890.60278	33634834.291	
11	Polygon ZM	12	Vertiente o piedemonte coluvio-deluvial	14810.788378	1691980.70931	

- Capa: Pendientes, Campo: -

Al ser un Modelo de Elevación Digital (DEM), se usaron todos los datos correspondientes a la capa. Por lo tanto, no se seleccionó ningún campo de la tabla de atributos en específico.

- Capa: Peligros Geológicos, Campo: -

Al ser un shapefile (.shp) vectorial del tipo puntos, se usaron todos los datos correspondientes a la capa. Por lo tanto, no se seleccionó ningún campo de la tabla de atributos en específico.

- Capa: Centro Poblado, Campo: Descripcio

Cent_Poblado							
FID	Shape *	OBJECTID	Descripcio	Fuente	Shape_Leng	Shape_Area	
0	Polygon ZM	1	Centro Poblados	Image Google Earth 2021	23039.86124	9350720.48139	
1	Polygon ZM	2	Otros_s_if	s_if	64360.12884	97359561.6771	

- Capa: Comunidades Campesinas, Campo: nom_comuni

Com_Campesinas												
FID	Shape *	FID_Comuni	objectid	nom_dpto	nom_prov	nom_dist	id_dist	nom_comuni	estado	datum_orig	proyeccion	fuelle
0	Polygon ZM	-1	0					ZONA ESTUDIO				
1	Polygon ZM	0	3628	APURIMAC	ABANCAY	ABANCAY	030101	HUAYLLABAMB	TITULADA	PSAD56	GEOGRAFICA	SBN
2	Polygon ZM	1	3641	APURIMAC	ABANCAY	ABANCAY	030101	ASILLO	TITULADA	PSAD56	GEOGRAFICA	SBN

- Capa: Predios Rurales, Campo: Descripcio

Pred_Rurales							
FID	Shape *	OBJECTID	FID_Predio	FID_sector	Shape_Leng	Shape_Area	Descripcio
0	Polygon ZM	1	1	-1	4700.963157	140699.847907	Predios rurales
1	Polygon ZM	2	-1	1	46021.230757	106569582.311	Area de estudio

- Capa: Cobertura Vegetal, Campo: CobVeg2013

Cob_Vegetal							
FID	Shape *	OBJECTID	FID_cobveg	CobVeg2013	FID_sector	Shape_Leng	Shape_Area
0	Polygon ZM	1	1	Agricultura costera y andina	2	117551.46502	67359919.8702
1	Polygon ZM	2	2	Area altoandina con escasa y sin vegetación	2	326.319054	3126.866275
2	Polygon ZM	3	3	Area urbana	2	8614.852785	2387578.48492
3	Polygon ZM	4	7	Bosque relicto mesoandino de coníferas	2	43516.121655	11407214.8736
4	Polygon ZM	5	8	Bosque xérico interandino	2	19371.480443	4711773.07573
5	Polygon ZM	6	12	Matorral arbustivo	2	62578.290611	8227722.01478
6	Polygon ZM	7	13	Pajonal andino	2	18069.446123	7667989.5877
7	Polygon ZM	8	14	Plantación Forestal	2	31024.354675	4887718.9665
8	Polygon ZM	9	15	Río	2	2308.973377	57238.418714

- Capa: Área Natural Protegida, Campo: anp_cate

ANP										
FID	Shape *	FID_Area	objectid_1	anp_gid	anp_codi	anp_cate	anp_nomb	anp_sect	anp_ubpo	anp_suleg
0	Polygon ZM	-1	0	0		Zona de Estudio				0
1	Polygon ZM	0	3378	91	SN04	Santuario Nacional	de Ampay		Apurímac	3635.5

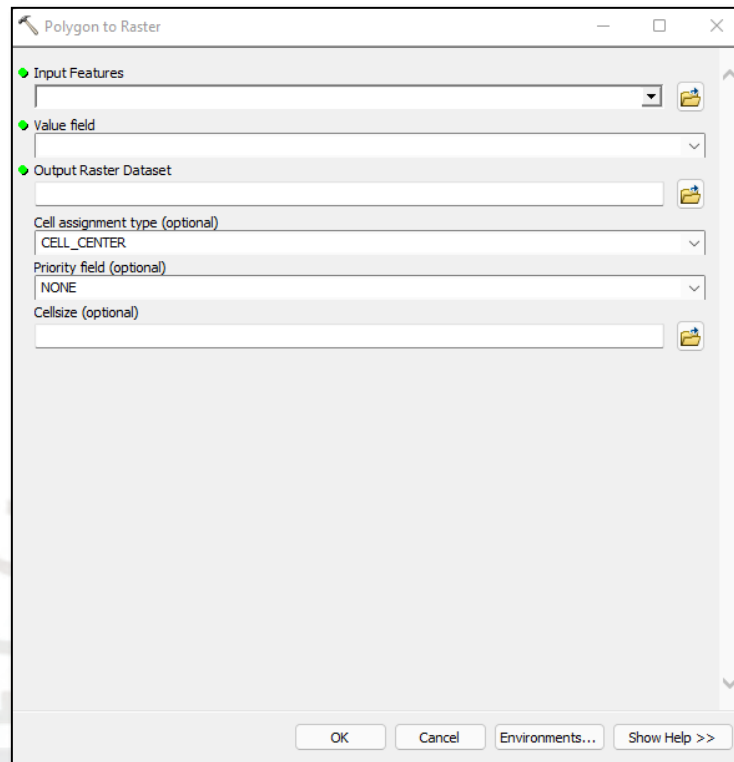
- Capa: Zona de Amortiguamiento, Campo: c_nomb

Amort										
FID	Shape *	FID_Zona_A	objectid_1	c_nomb	anp_codi	anp_nomb	za_super	za_pvpm	za_balea	
0	Polygon ZM	-1	0	Zona de Estudio				0		
1	Polygon ZM	0	49	Santuario Nacional	SN04	de Ampay	5702.068558	2015-2019	R.P. N° 168-2015-SERNANP	

Anexo N°3: Configuración de las Herramientas de Conversión a Formato

Ráster

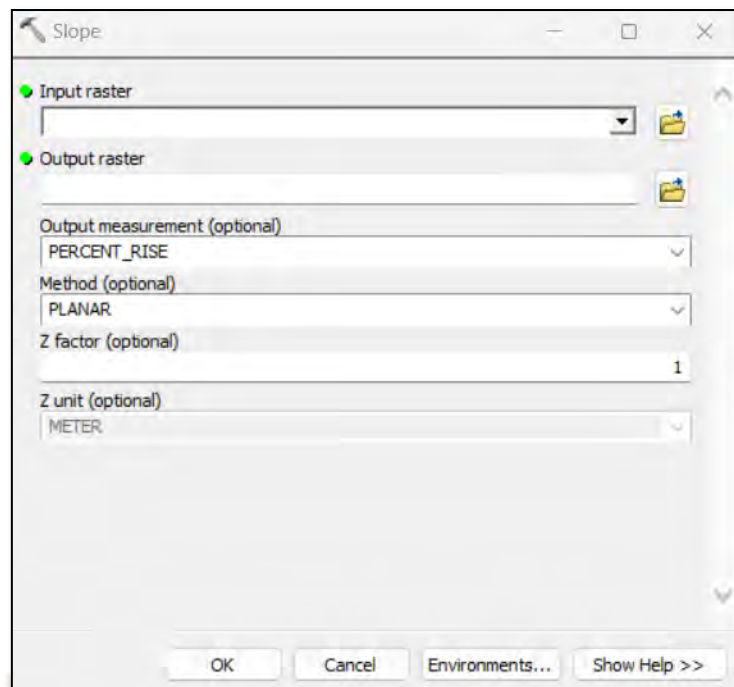
Apartado de configuración de la herramienta *Polygon to Raster*



Se completaron los siguientes espacios:

- Input features: Cargar la capa de entada.
- Value field: Seleccionar el campo de interés.
- Output raster dataset: Escoger ruta de guardado y nombre de la capa de salida.
- Cellsize (optional): Cargar la capa, en función del cual se desea el tamaño de celda de cada ráster, es decir, del DEM.

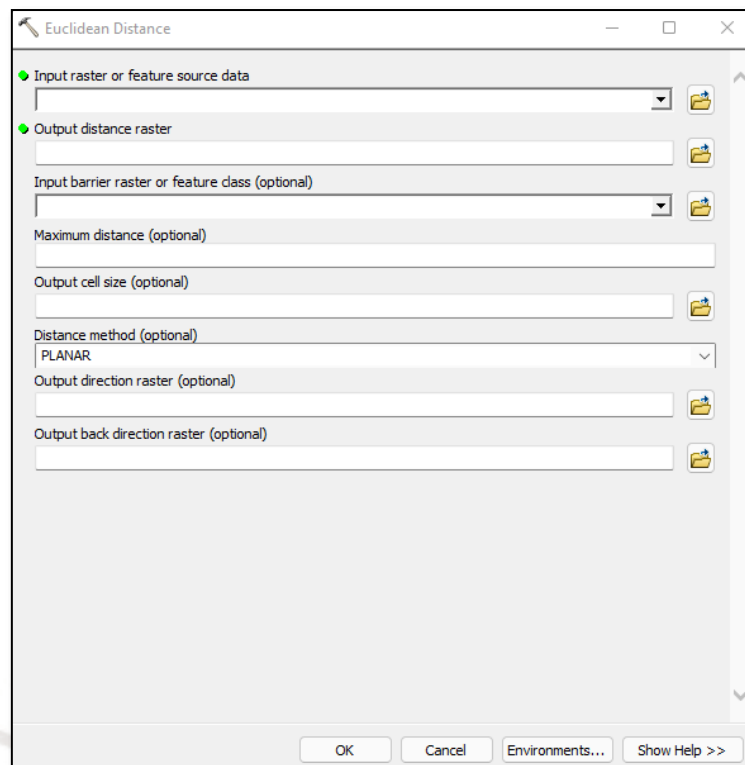
Apartado de configuración de la herramienta *Slope*



Se completaron los siguientes espacios:

- Input raster: Cargar la capa de entada.
- Output raster: Escoger ruta de guardado y nombre de la capa de salida.
- Output measurement (optional): Seleccionar la opción Percent_Rise.

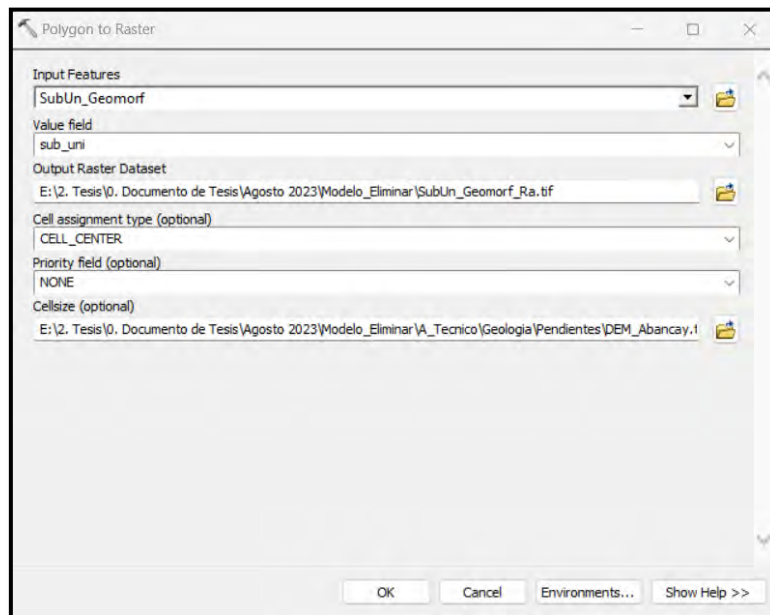
Apartado de configuración de la herramienta *Euclidean Distance*



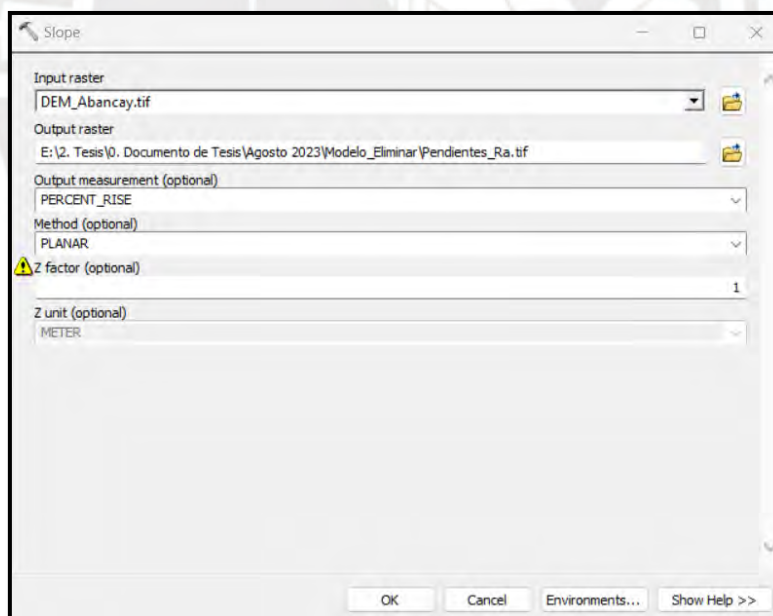
Se completaron los siguientes espacios:

- Input raster o feature source data: Cargar la capa de entada.
- Output distance raster: Escoger ruta de guardado y nombre de la capa de salida.

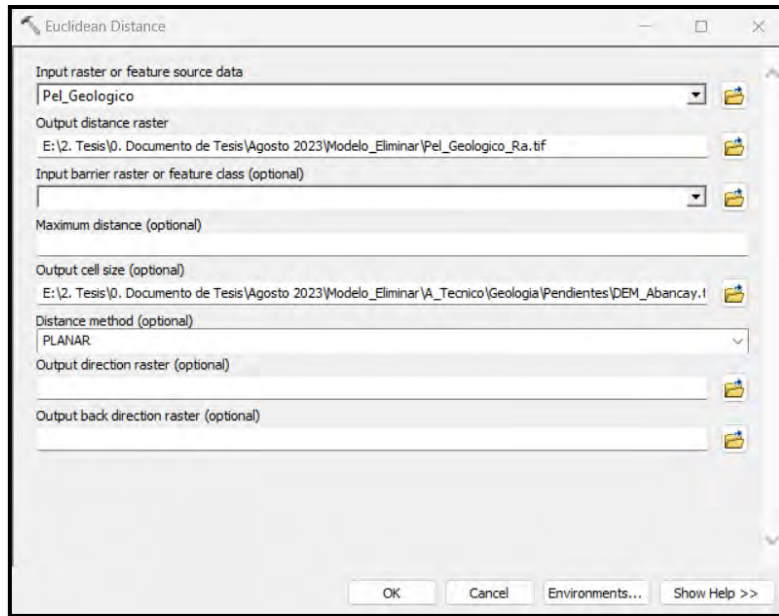
- Capa: Sub-Unidades Geomorfológicas, Herramienta: *Polygon to Raster*, Campo: sub_uni



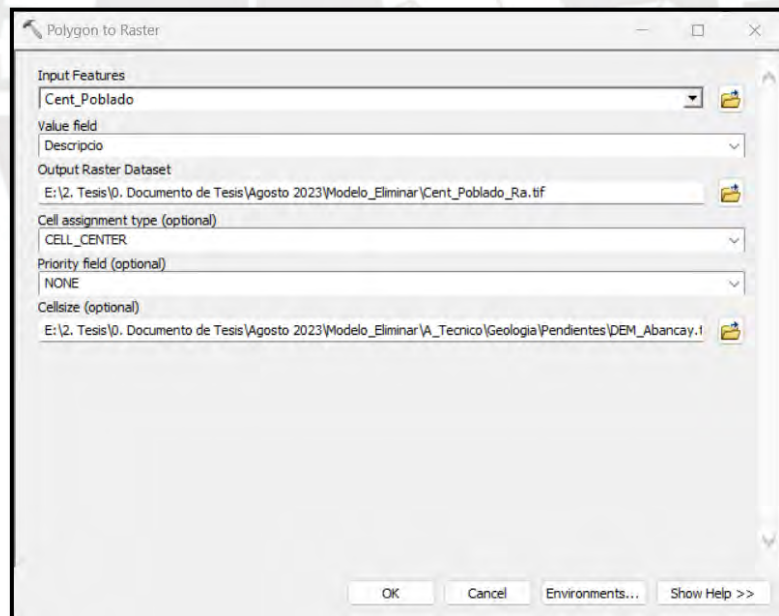
- Capa: Pendientes, Herramienta: *Slope*, Campo: -



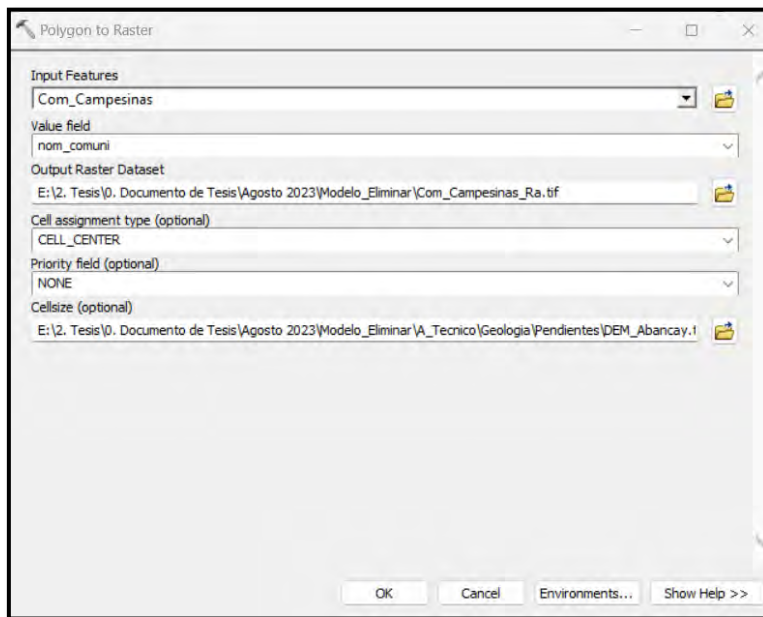
- Capa: Peligros Geológicos, Herramienta: *Euclidean Distance*, Campo: -



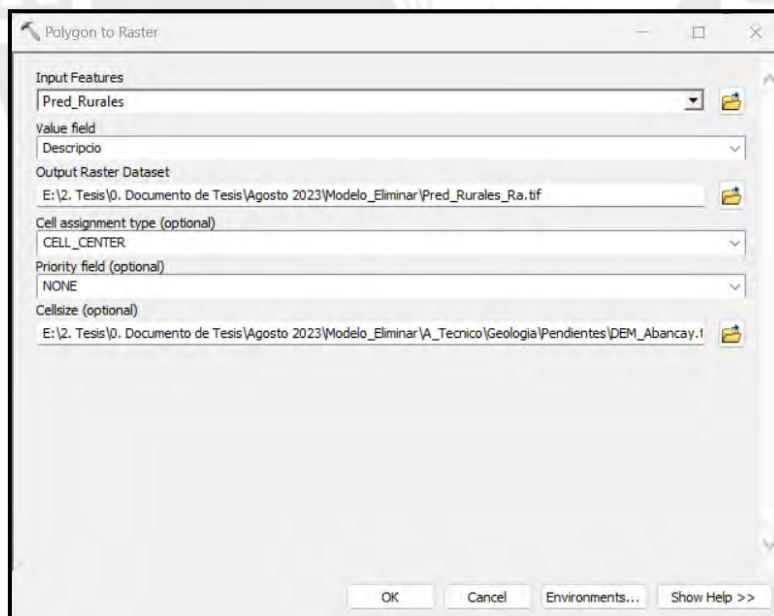
- Capa: Centro Poblado, Herramienta: *Polygon to Raster*, Campo: Descripcio



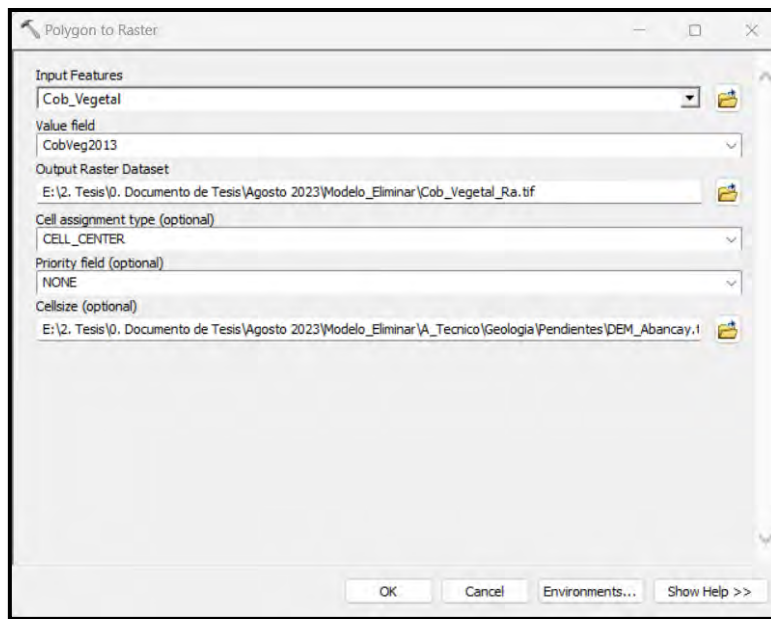
- Capa: Comunidades Campesinas, Herramienta: *Polygon to Raster*, Campo: nom_comuni



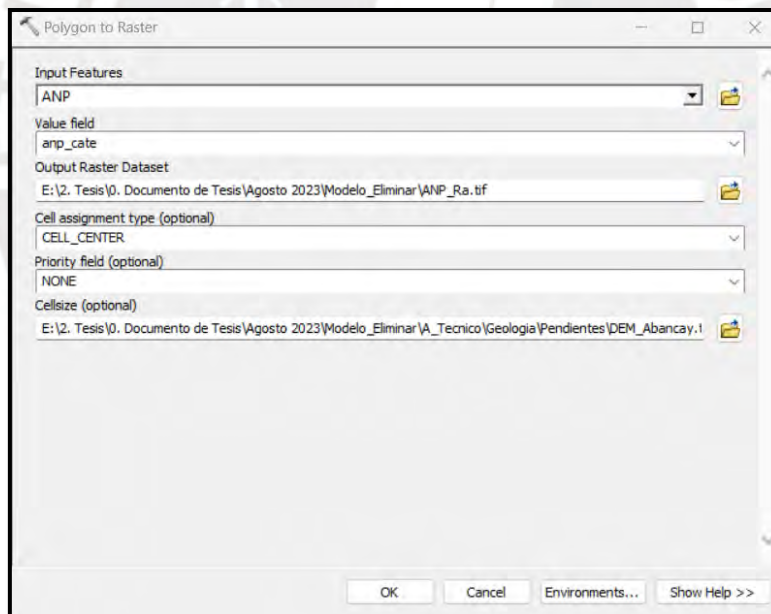
- Capa: Predios Rurales, Herramienta: *Polygon to Raster*, Campo: Descripcio



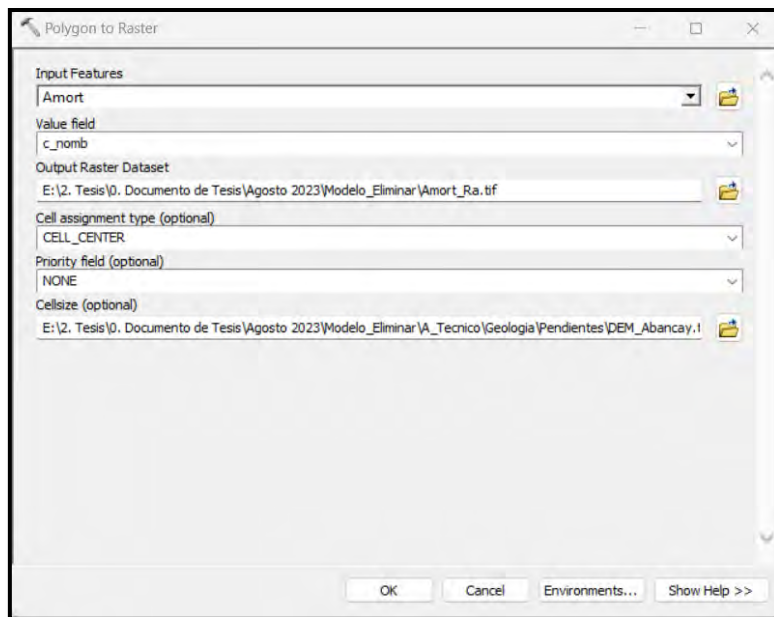
- Capa: Cobertura Vegetal, Herramienta: *Polygon to Raster*, Campo: CobVeg2013



- Capa: Área Natural Protegida, Herramienta: *Polygon to Raster*, Campo: anp_cate



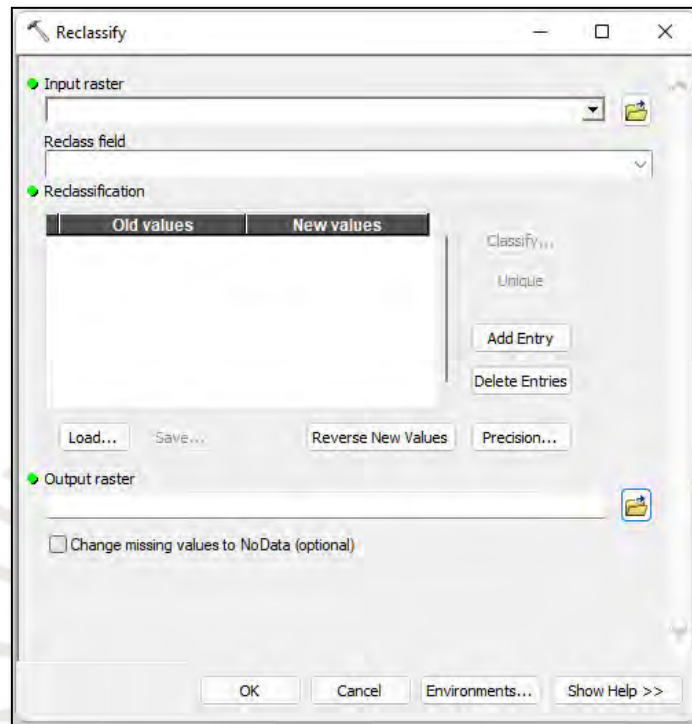
- Capa: Zona de Amortiguamiento, Herramienta: *Polygon to Raster*, Campo: c_nomb



Anexo N°4: Configuración de las Herramienta de Reclasificación de las

Capas

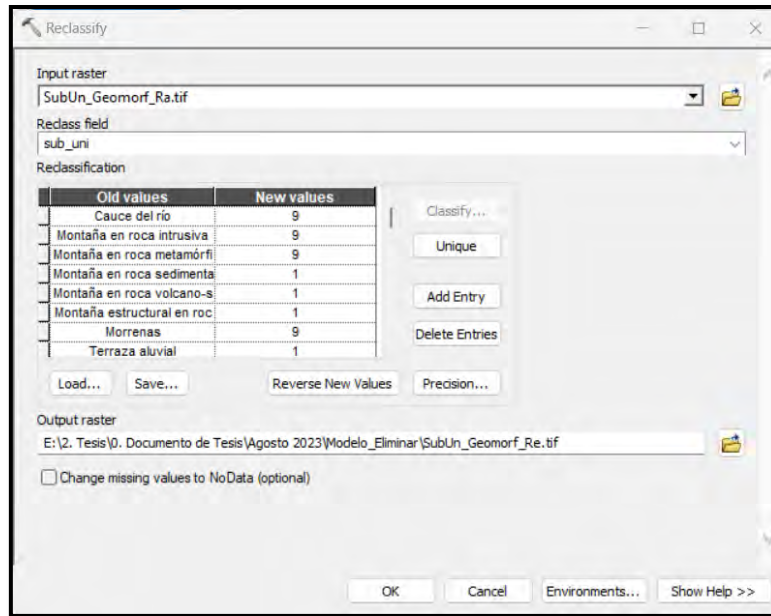
Apartado de configuración de la herramienta *Reclassify*



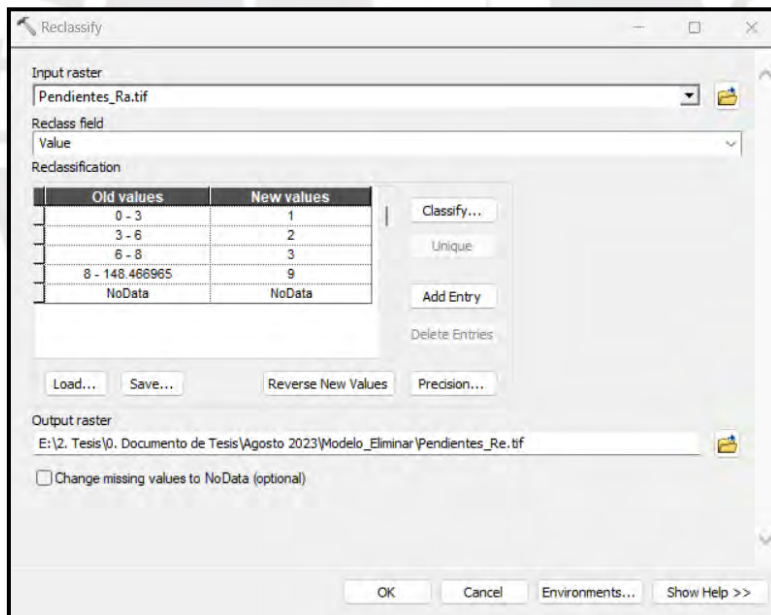
Se completaron los siguientes espacios:

- Input raster: Cargar la capa de entrada.
- Reclass field: Escoger el campo de interés cuyos datos serán reclasificados.
- Reclassification: Asignar valores, según la escala de reclasificación, a los datos del campo de interés.
- Output raster: Escoger ruta de guardado y nombre de la capa de salida.

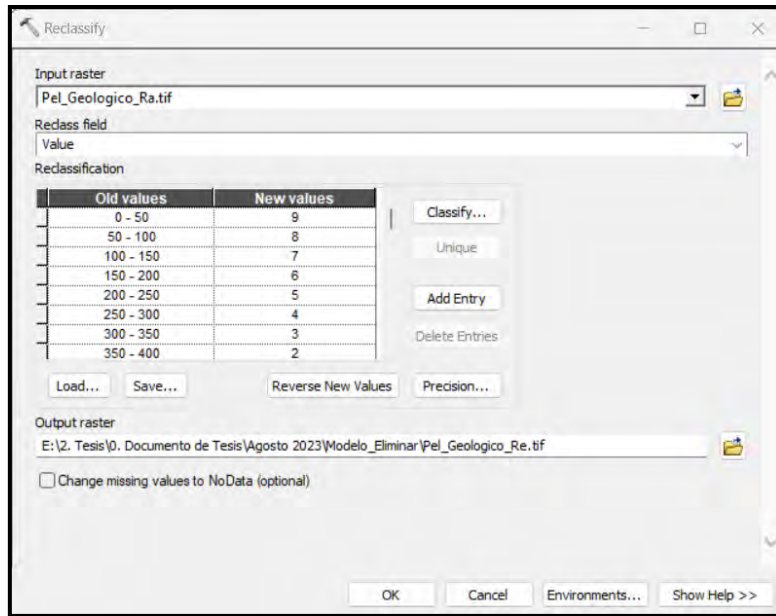
- Capa: Sub-Unidades Geomorfológicas, Herramienta: *Reclassify*, Campo: sub_uni



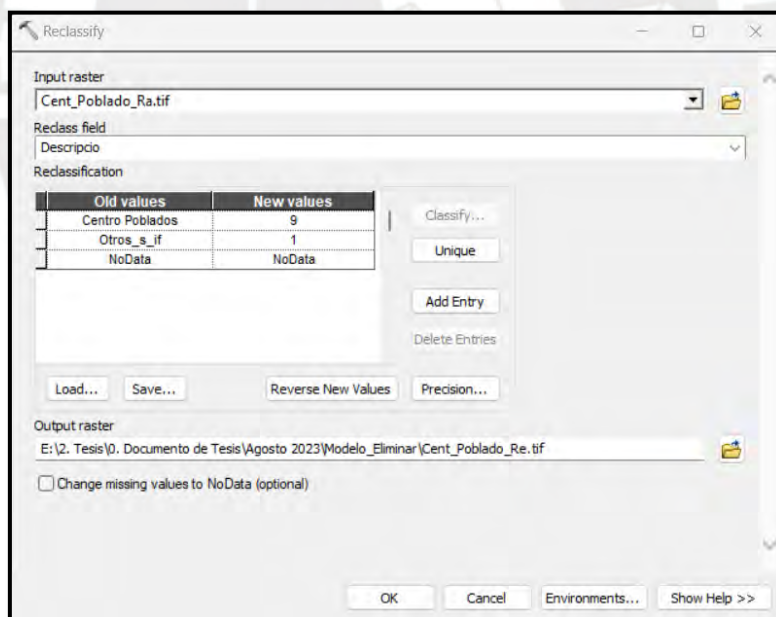
- Capa: Pendientes, Herramienta: *Reclassify*, Campo: -



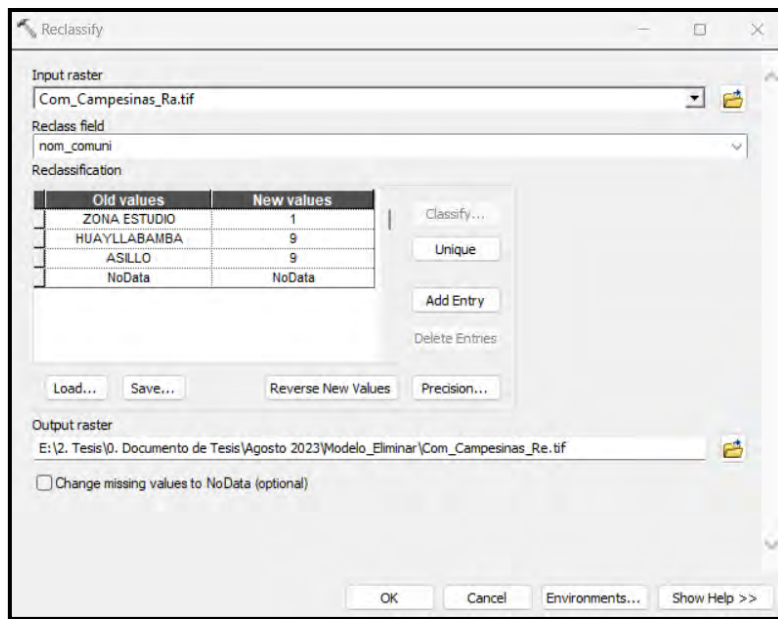
- Capa: Peligros Geológicos, Herramienta: *Reclassify*, Campo: -



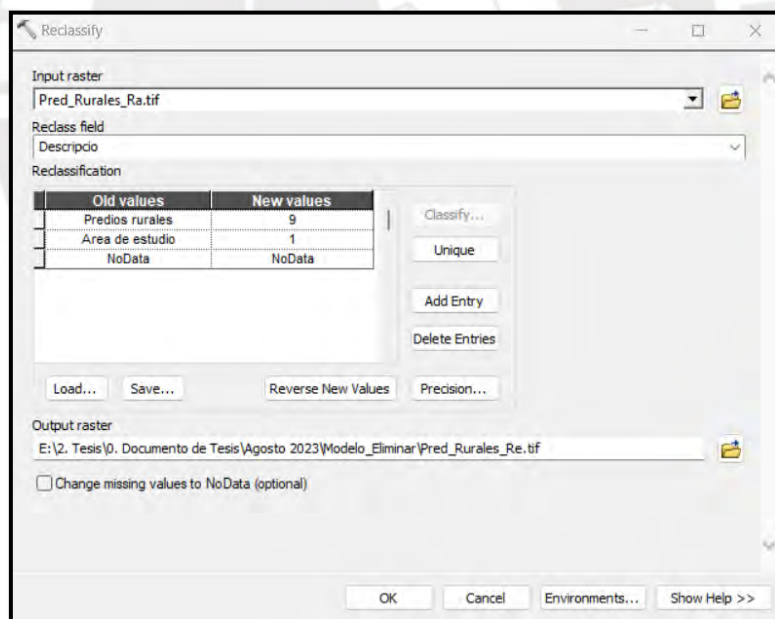
- Capa: Centro Poblado, Herramienta: *Reclassify*, Campo: Descripcio



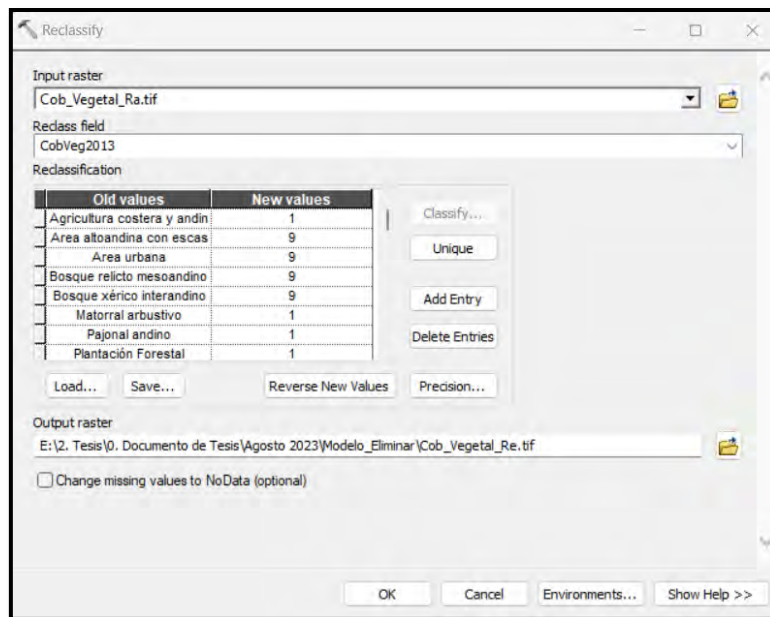
- Capa: Comunidades Campesinas, Herramienta: *Reclassify*, Campo: nom_comuni



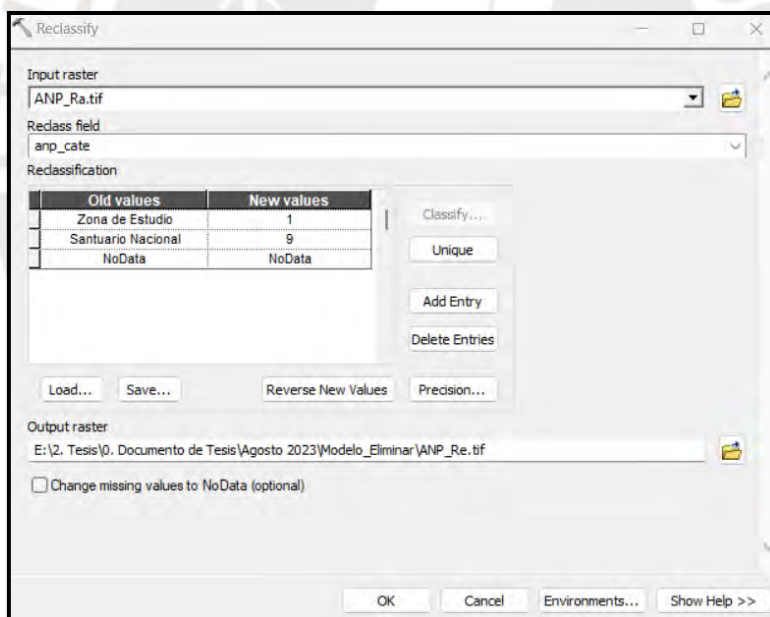
- Capa: Predios Rurales, Herramienta: *Reclassify*, Campo: Descripcio



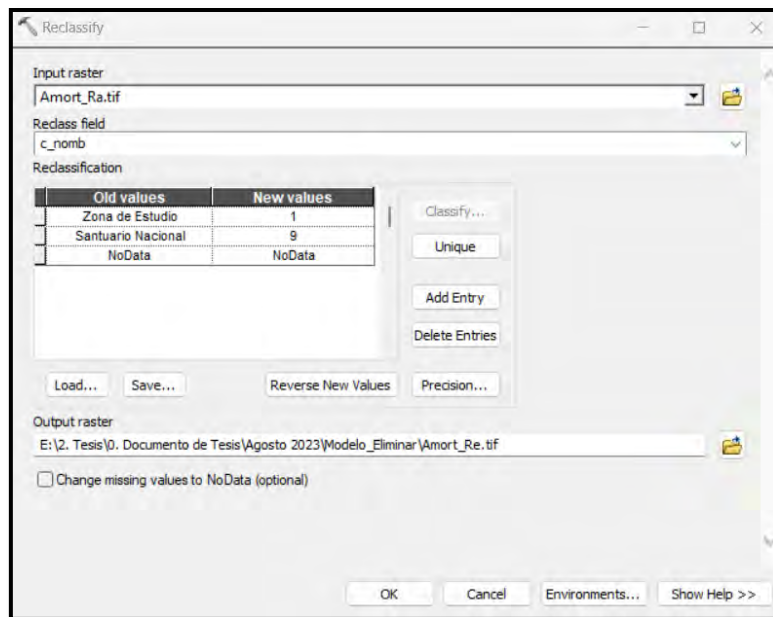
- Capa: Cobertura Vegetal, Herramienta: *Reclassify*, Campo: CobVeg2013



- Capa: Área Natural Protegida, Herramienta: *Reclassify*, Campo: anp_cate

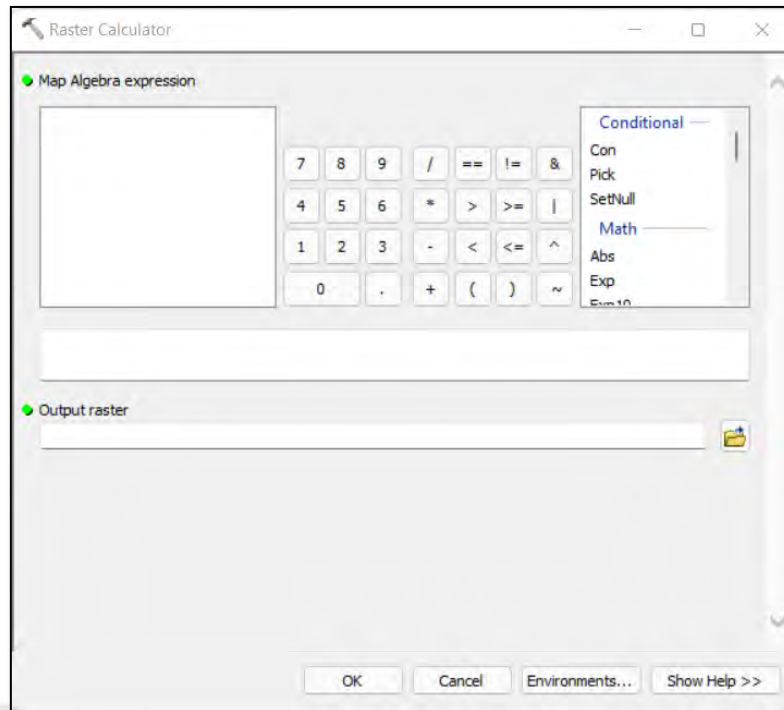


- Capa: Zona de Amortiguamiento, Herramienta: *Reclassify*, Campo: *c_nomb*



Anexo N°5: Configuración de la Herramienta *Raster Calculator*

Apartado de configuración de la herramienta *Raster Calculator*.

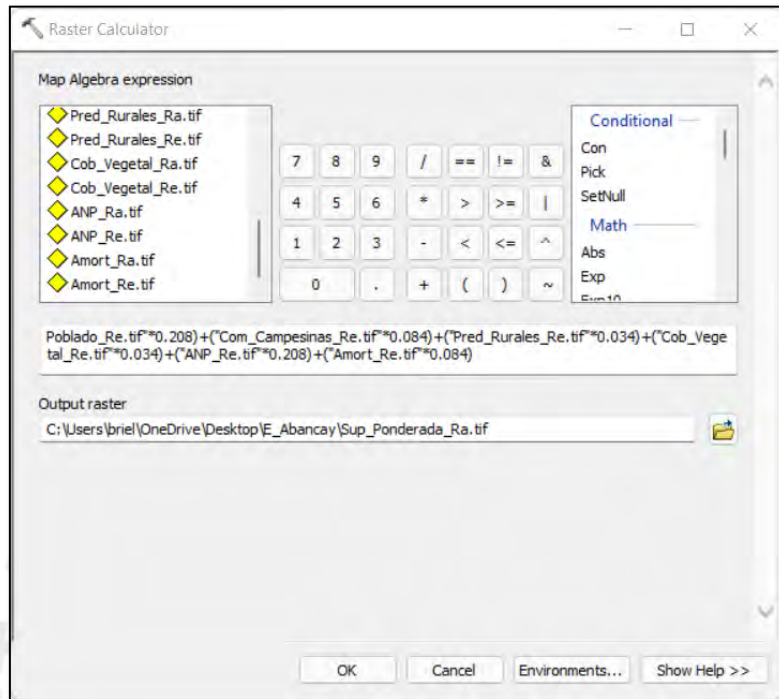


Se completaron los siguientes espacios:

- Map Algebra expression: Multiplicar las capas reclasificadas, por los valores ponderados obtenidos durante el proceso de análisis jerárquico. Luego, sumar cada producto. (Cabe señalar que la suma de los valores asignados deber ser 1, es decir, 100%)
- Output raster: Escoger ruta de guardado y nombre de la capa de salida

En la siguiente figura se observa la forma en que fue completada la ventana de configuración de la herramienta *Raster Calculator*.

Configuración de la herramienta *Raster Calculator*.

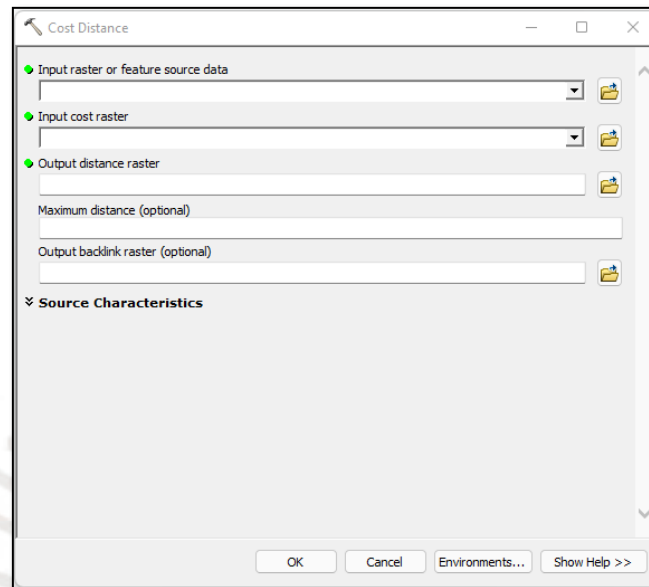


Map Algebra expression se completó con la siguiente expresión que permite asignar valores ponderados a cada capa y superponerlas, haciendo uso de los operadores matemáticos de multiplicación y adición, respectivamente.

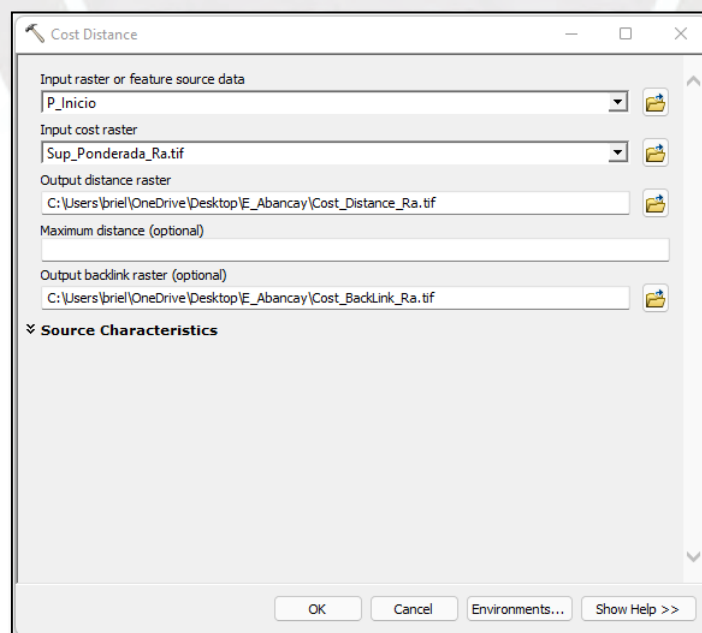
$$\begin{aligned}
 & ("SubUn_Geomorf_Re.tif"*0.069) + ("Pendientes_Re.tif"*0.208) \\
 & + ("Pel_Geologico_Re.tif"*0.069) + ("Cent_Poblado_Re.tif"*0.208) \\
 & + ("Com_Campesinas_Re.tif"*0.084) + ("Pred_Rurales_Re.tif"*0.034) \\
 & + ("Cob_Vegetal_Re.tif"*0.034) + ("ANP_Re.tif"*0.208) + ("Amort_Re.tif"*0.084)
 \end{aligned}$$

Anexo N°6: Configuración de la Herramienta *Cost Distance* (Coste de Distancia)

Apartado de configuración de la herramienta *Cost Distance*.



Luego, en el apartado de configuración de la herramienta *Cost Distance*, se completaron los siguientes espacios.



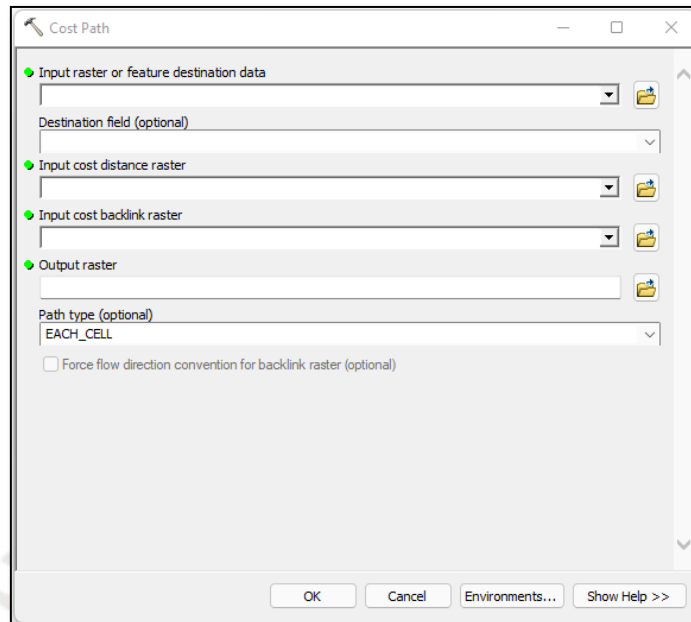
Se completaron los siguientes espacios:

- Input raster or feature source data: Cargar la capa de Punto de Inicio.
- Input cost raster: Cargar la capa de Superposición Ponderada.
- Output distance raster: Escoger ruta de guardado y nombre de la capa de salida.
- Output backlink raster (optional): Escoger ruta de guardado y nombre de la capa de salida del backlink.

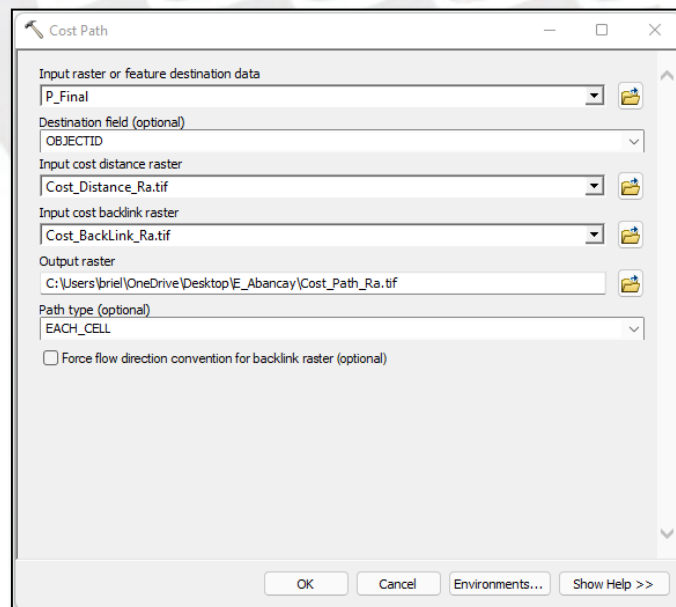


Anexo N°7: Configuración de la Herramienta Cost Path (Ruta de Coste)

Apartado de configuración de la herramienta *Cost Path*



Luego, en el apartado de configuración de la herramienta *Cost Path*, se completaron los siguientes espacios.

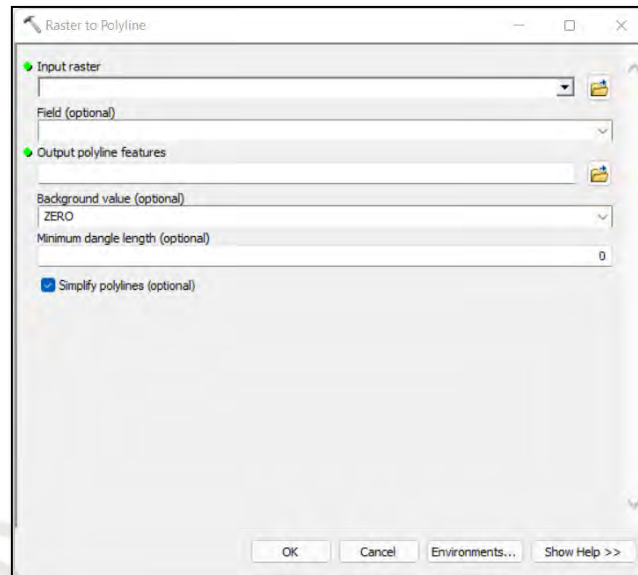


- Input raster or feature destination data: Cargar la capa de Punto Final.
- Input cost distance raster: Cargar la capa de Coste de Distancia.
- Input cost backlink raster: Cargar la capa de backlink, obtenida con la capa de Coste de distancia.
- Output raster: Escoger la ruta de guardado y nombre de la capa de salida.

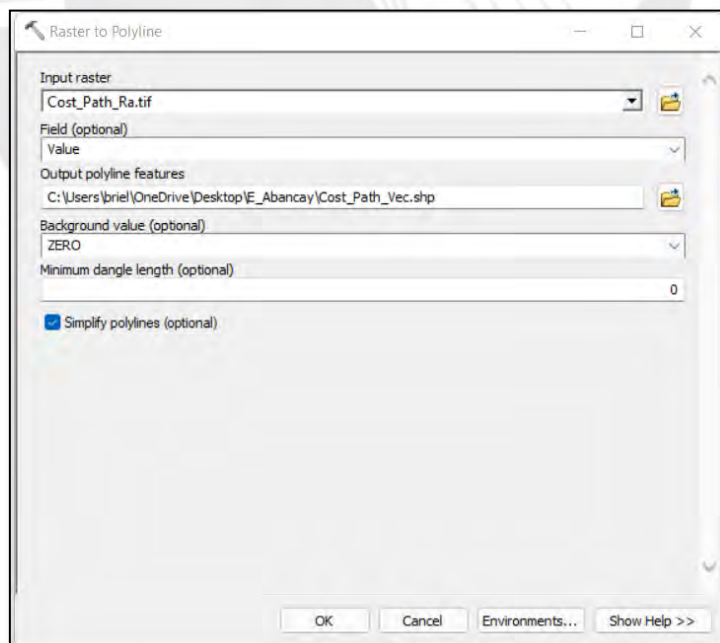


Anexo N°8: Configuración de la Herramienta *Raster to Polyline*

Apartado de configuración de la herramienta Raster to Polyline.

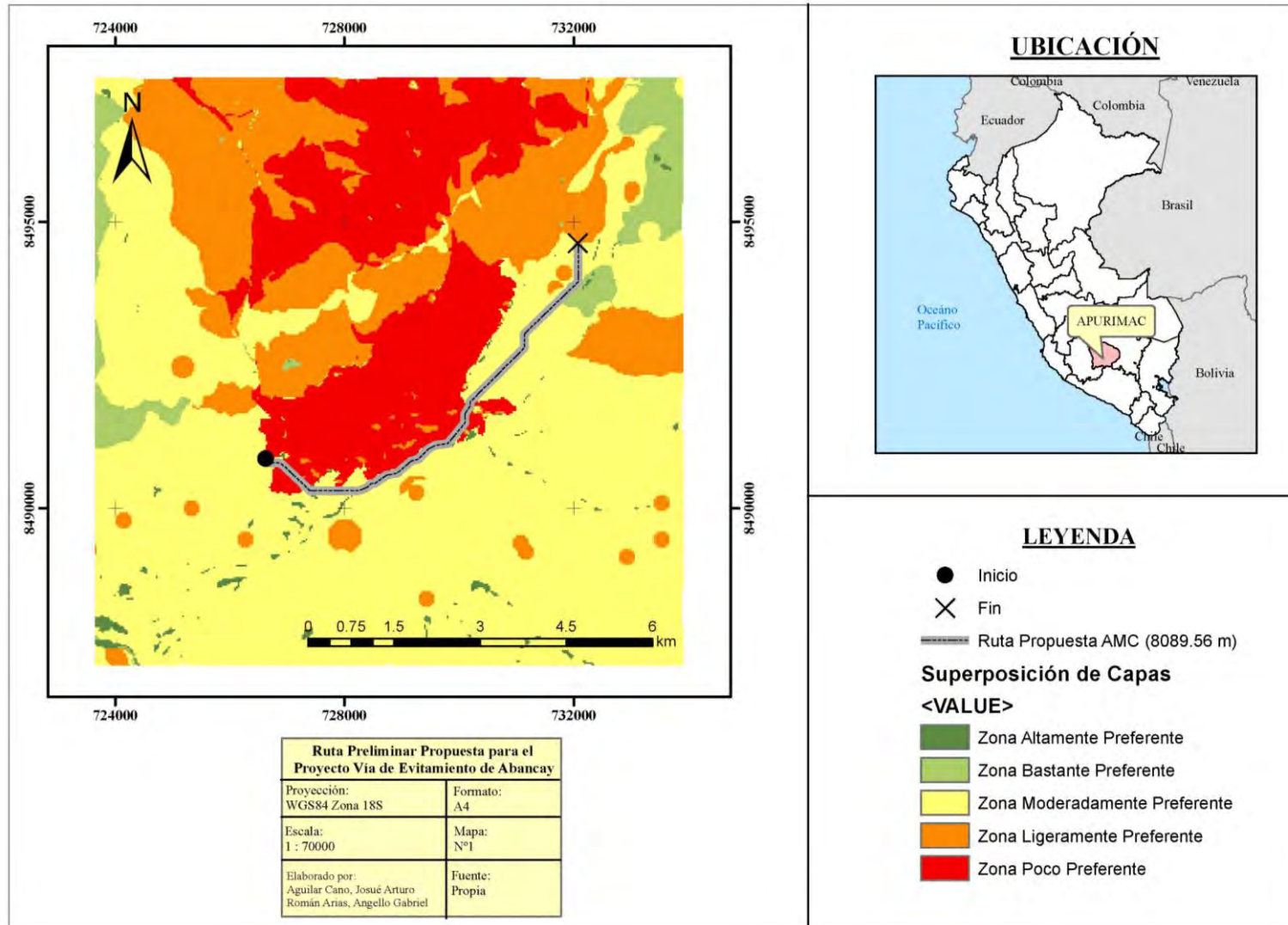


Luego, en el apartado de configuración de la herramienta Raster to Polyline, se completaron los siguientes espacios.



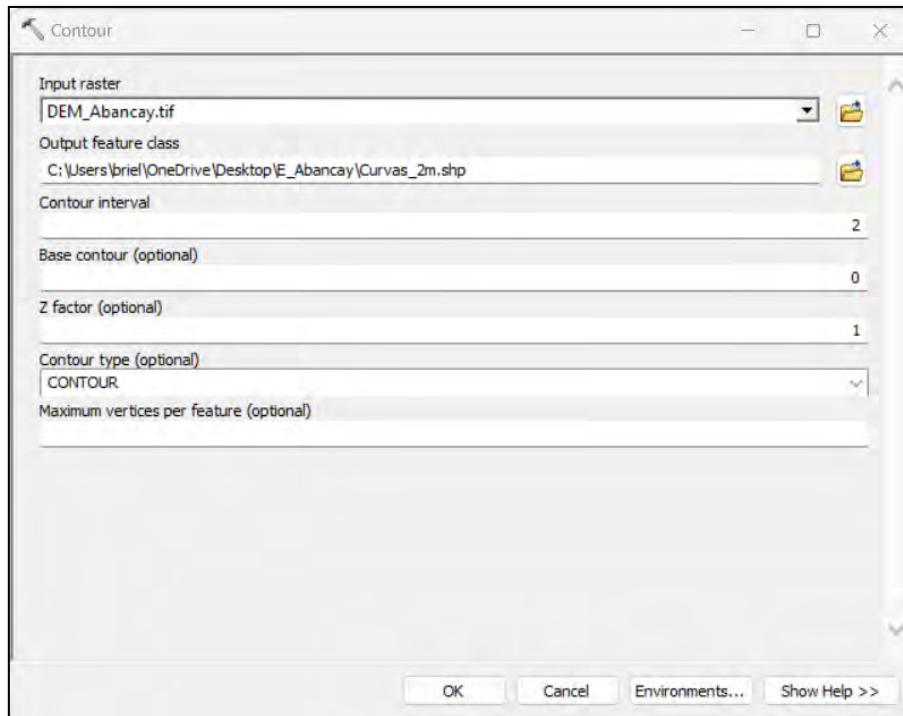
- Input raster: Cargar la capa de entrada *Cost Path* (o Ruta de Coste)
- Output polyline features: Escoger la ruta de guardado y nombre de la capa de salida.

Anexo N°9: Ruta Propuesta por el Método de Análisis Multicriterio



Anexo N°10: Configuración de la Herramienta *Contour*

Ventana de configuración de la herramienta *Contour*

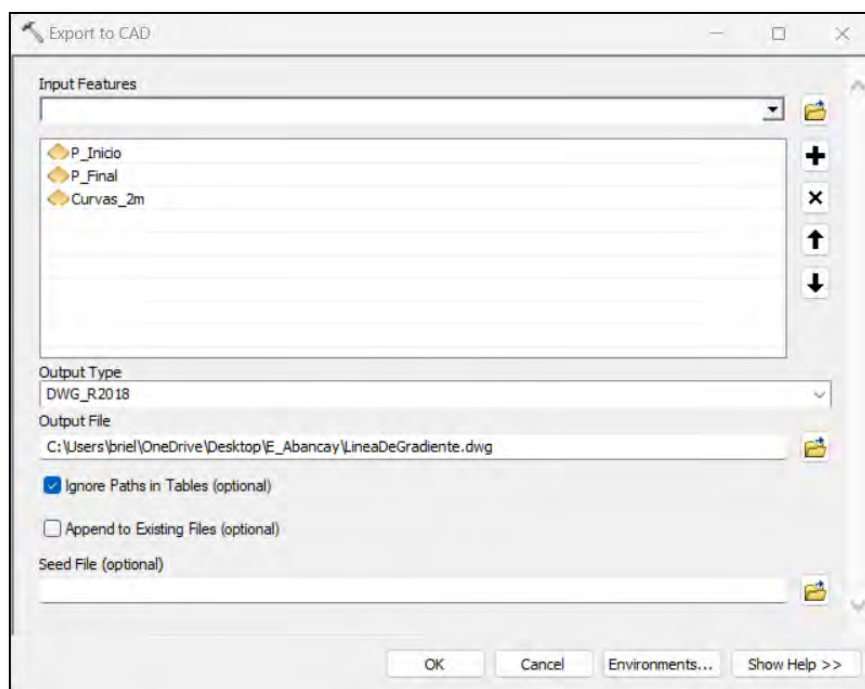


Los siguientes espacios fueron completados:

- Input raster: Cargar la capa de entrada, es decir, el DEM.
- Output polyline features: Seleccionar la ruta de guardado de la capa de salida.
- Contour interval: Introducir el valor de la equidistancia entre cada curva de nivel, es decir, 2 metros en el presente caso.

Anexo N°11: Configuración de la Herramienta *Export To CAD*

Ventana de configuración de *Export To CAD*.

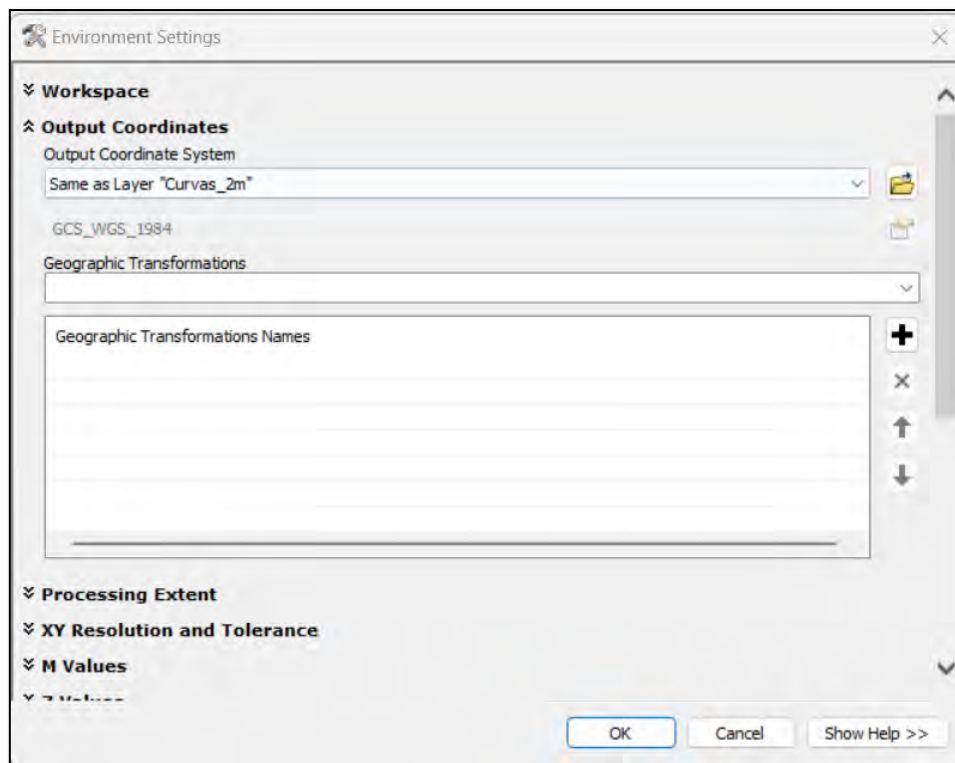


Los siguientes espacios fueron completados:

- Input Features: Cargar las capas de entrada.
- Output Type: Seleccionar el formato de salida de la capa.
- Output File: Escoger la ruta de guardado de la capa de salida.

Luego, en el apartado *Output Coordinates*, dentro de la opción *Environments*, de la ventana de configuración, se seleccionó una de las capas, cuyo sistema de coordenadas sirvió como referencia para las demás al momento de ser exportadas.

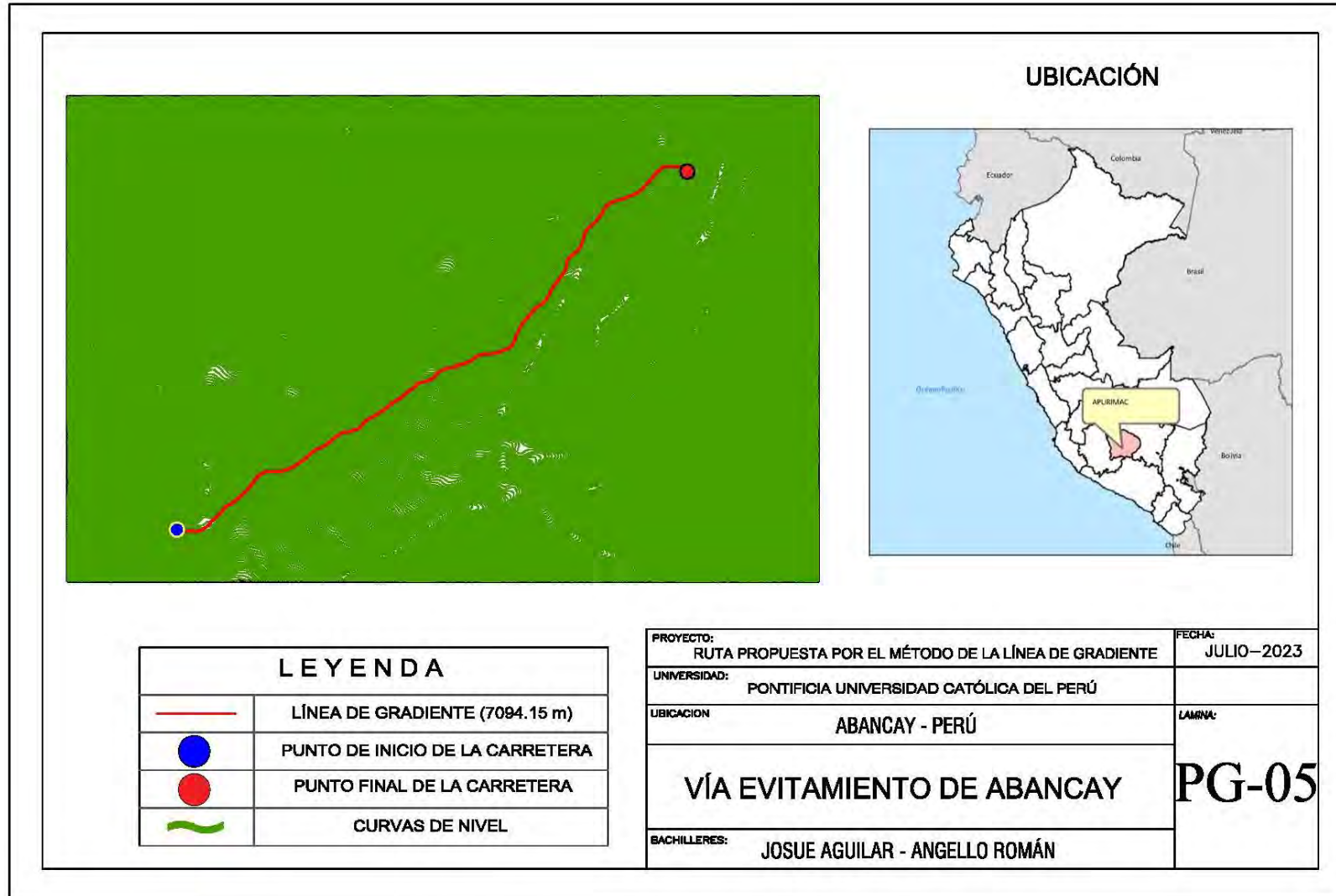
Configuración del sistema de coordenadas de referencia



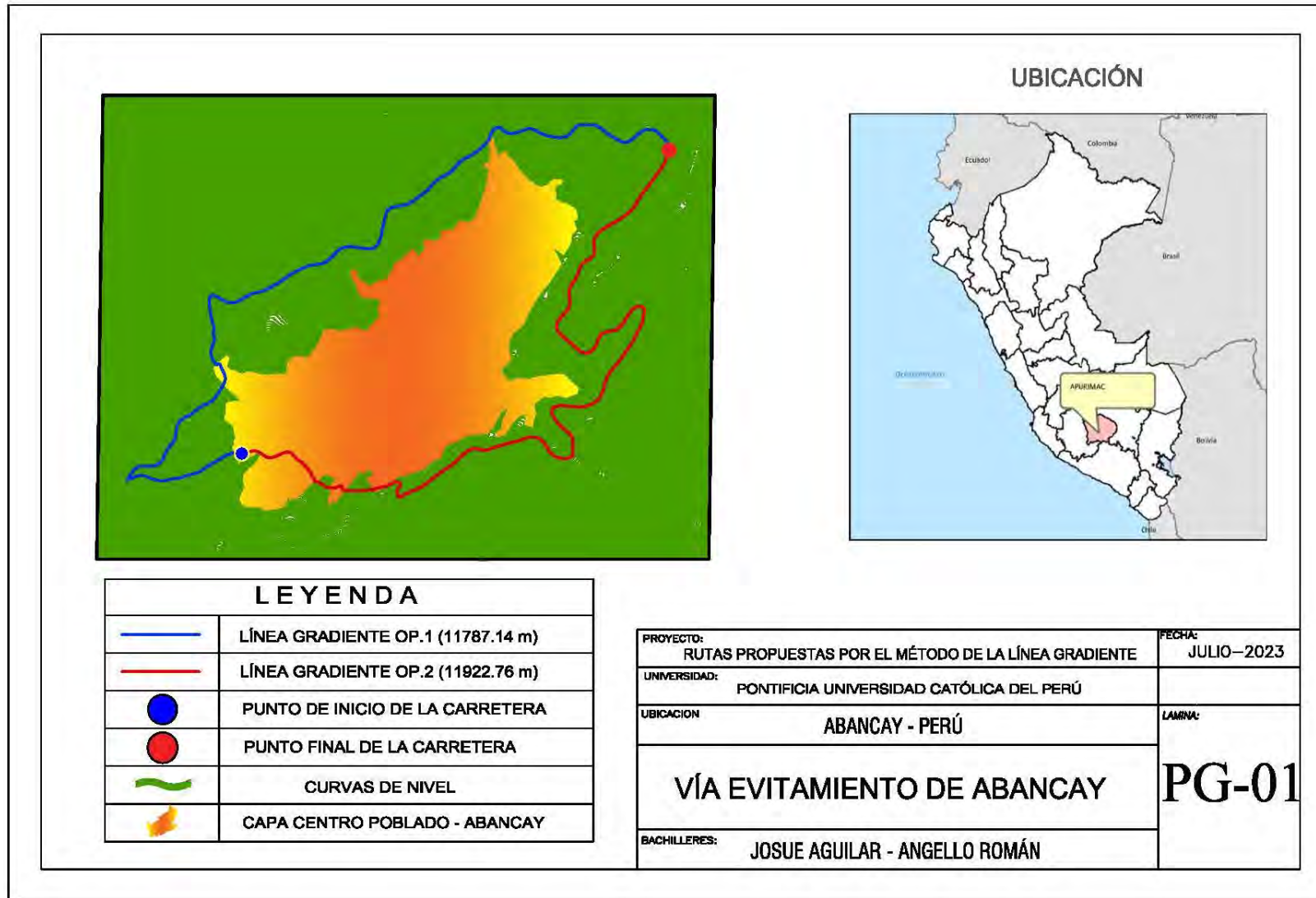
Los siguientes espacios fueron completados:

- Same as Layer: Cargar la capa cuyo sistema de coordenadas sirvió de referencia.

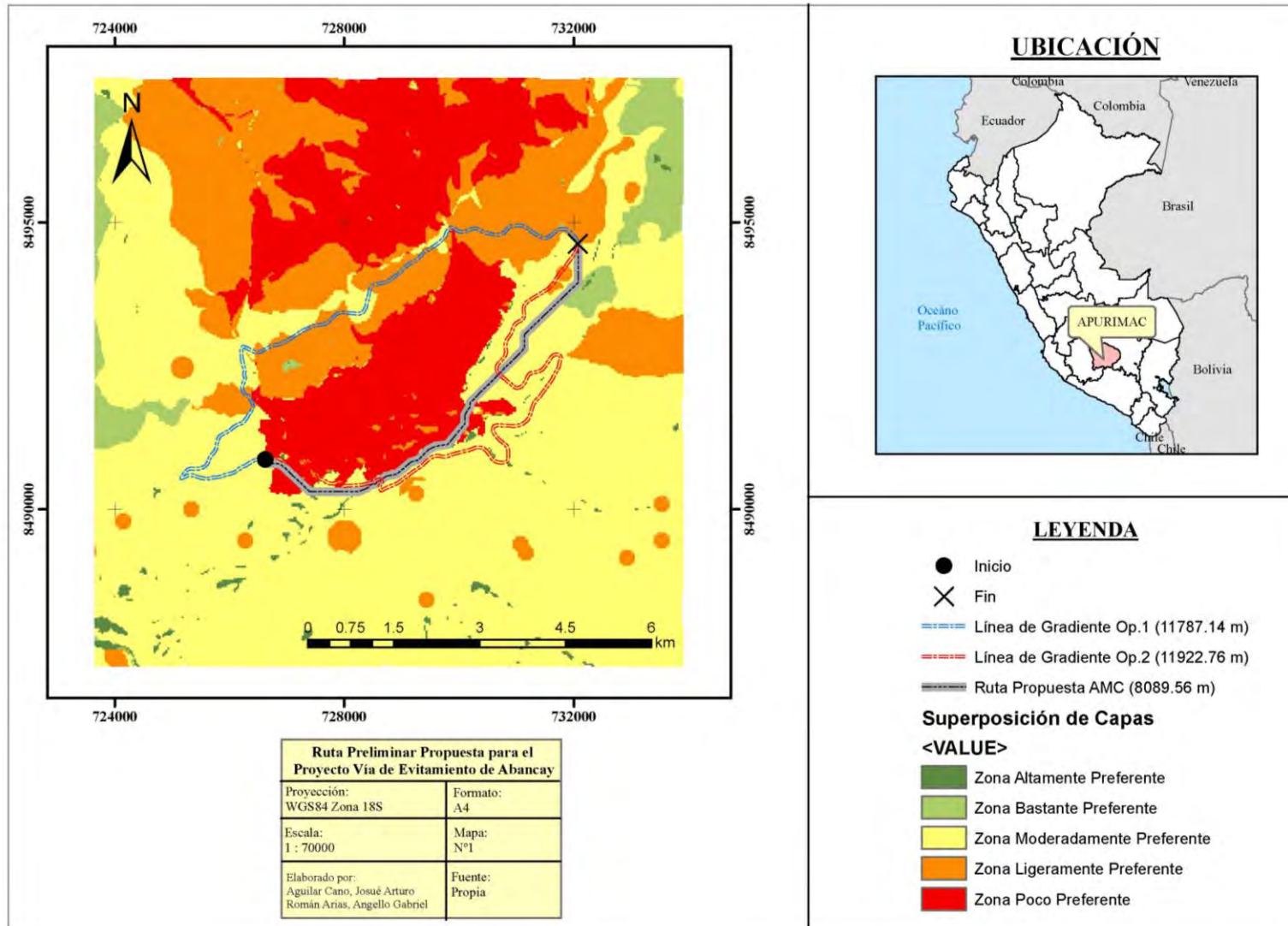
Anexo N°12: Ruta Propuesta por el Método de la Línea de Gradiente



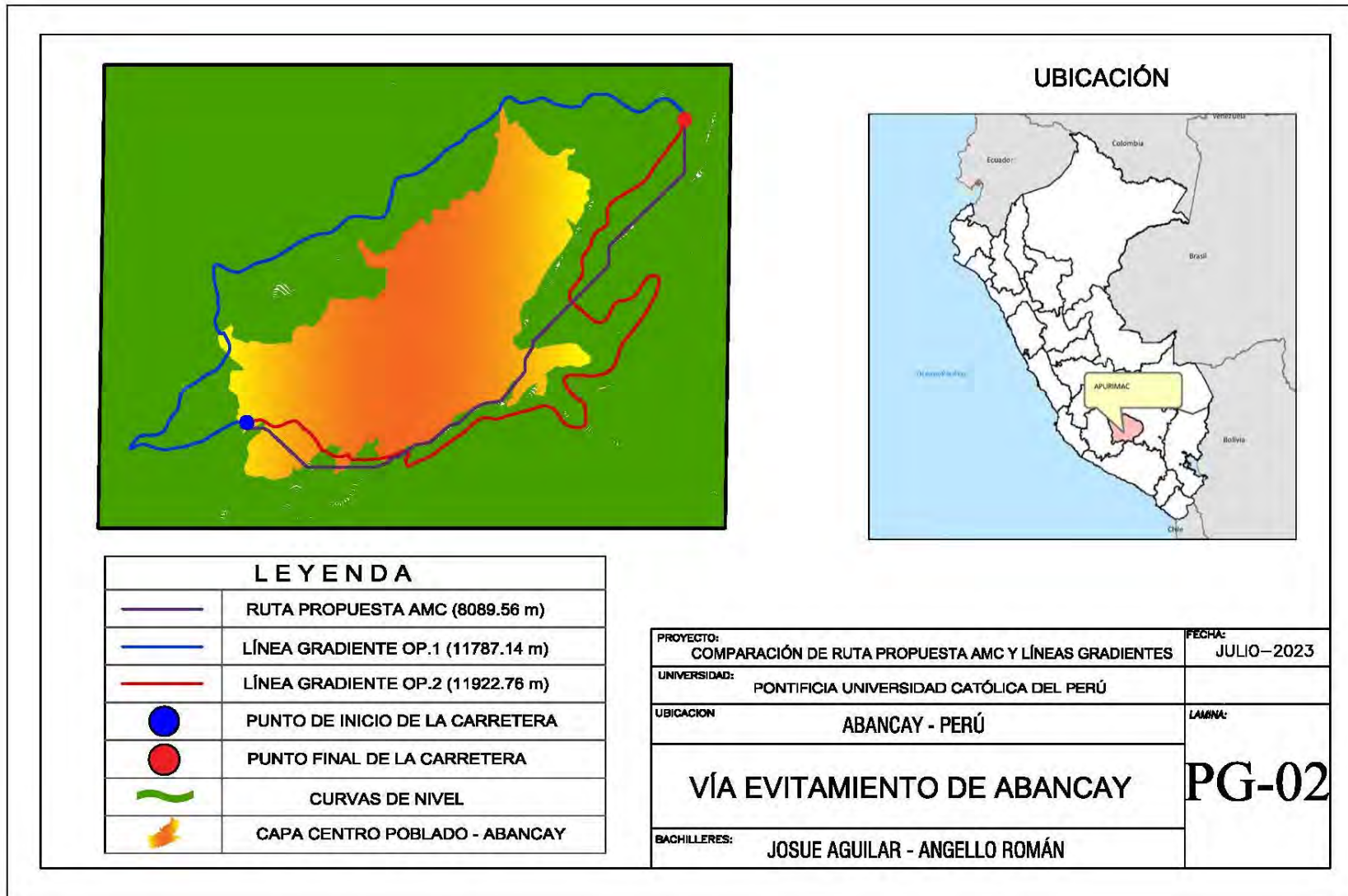
Anexo N°13: Rutas Propuestas por el Método de la Línea de Gradiente, Considerando la Capa "Centro Poblado"



Anexo N°14: Comparación Entre Rutas Evaluadas (Plano en ArcMap)



Anexo N°15: Comparación Entre Rutas Evaluadas (Plano en Civil3D)



Anexo N°16: Comentarios de Ingenieros Expertos en Proyectos de

Infraestructura Vial (Juicio de Expertos)

Estimado ingeniero (a),

Le escribe los bachilleres Angello Román Arias y Josue Aguilar Cano, de la facultad de Ingeniería Civil de la Pontificia Universidad Católica del Perú. Antes de todo, muchas gracias por la atención prestada durante la reunión que se sostuvo. Le escribimos para solicitarle formalmente sus comentarios sobre la exposición que realizamos y sobre los archivos que le fueron alcanzados, refiriéndonos a las diapositivas y al Anexo N°7 y el Anexo N8 de nuestro trabajo de tesis.

Sin más, quedamos atentos a su opinión basada en su experiencia dentro proyectos de infraestructura vial en los que participó.

Gracias.

Atte. Bach. Angello Gabriel Román Arias y Bach. Josue Arturo Aguilar Cano.

Comentario:

Los jóvenes bachilleres Angello Román y Josué Aguilar me presentaron su tesis "Propuesta de aplicación del método de análisis multicriterio con el software ArcGIS, para la selección eficiente de la ruta preliminar de la Via de Evitamiento de la ciudad de Abancay". Tema muy interesante ya que los proyectos viales en el país son muy importantes, y de acuerdo a lo expuesto y archivos alcanzados, se propone una comparación de métodos para obtener un trazo preliminar de carretera eficiente. Se entiende que el método de análisis multicriterio comprende mayores criterios para obtener una solución a comparación del método de la línea de gradiente, lo cual resulta beneficioso para prever diferentes tipos de cuestiones desde la concepción de estos proyectos. Pero también se resalta el hecho de la complejidad y la mayor cantidad de procesos que requiere el método de análisis multicriterio. Por otro lado, el manejo de los programas son cuestiones técnicas para lo cual existen profesionales expertos en ello volviéndolo una opción viable y manejable de acuerdo a los resultados mostrados por los bachilleres. Por lo tanto, considero que es una propuesta válida en las etapas iniciales de un proyecto vial que ayudará a contemplar mayores consideraciones que la línea de gradiente. Sin más que agregar, me parece el tema muy interesante sobre el cual espero continuar escuchando y ver su aplicabilidad y desarrollo en el ejercicio profesional. Y sobre todo espero los mejores éxitos para los bachilleres.



César Augusto Lambert Echeverría

Ingeniero Civil

CIP: 30838

Estimado ingeniero (a),

Le escribe los bachilleres Angello Román Arias y Josue Aguilar Cano, de la facultad de Ingeniería Civil de la Pontificia Universidad Católica del Perú. Antes de todo, muchas gracias por la atención prestada durante la reunión que se sostuvo. Le escribimos para solicitarle formalmente sus comentarios sobre la exposición que realizamos y sobre los archivos que le fueron alcanzados, refiriéndonos a las diapositivas y al Anexo N°7 y el Anexo N8 de nuestro trabajo de tesis.

Sin más, quedamos atentos a su opinión basada en su experiencia dentro proyectos de infraestructura vial en los que participó.

Gracias.

Atte. Bach. Angello Gabriel Román Arias y Bach. Josue Arturo Aguilar Cano.

Comentario:

Los bachilleres en Ingeniería Civil Angello Román Arias y Josué Aguilar Cano alcanzan su tesis "Propuesta de aplicación del método de análisis multicriterio con el software arcgis, para la selección eficiente de la ruta preliminar de la vía de evitamiento de la ciudad de Abancay". Al tener conocimiento y haber analizado los archivos presentados, considero que lo expuesto es un tema importante para los proyectos viales en el país, debido a que un trazo correcto evita todos los problemas y retrasos que se originan durante la ejecución.

La comparación de métodos para definir el trazo preliminar de carretera resulta ser eficiente, considerando que el método de análisis multicriterio abarca mayores criterios para una solución a comparación que el método de la línea de gradiente. Por lo tanto, es un método más laborioso y por ende ventajoso, pero resulta beneficioso para considerar diferentes tipos de criterios desde la concepción de un proyecto de carretera.

Considerando el tema interesante, deseo a los Sres. Bachilleres Angello Román Arias y Josué Aguilar Cano éxitos profesionales.



Firma

Nombres y apellidos: Eduarda Luz Marina Quisiyanpanqui Quispe

CIP: 42661

Estimado ingeniero (a),

Le escribe los bachilleres Angello Román Arias y Josue Aguilar Cano, de la facultad de Ingeniería Civil de la Pontificia Universidad Católica del Perú. Antes de todo, muchas gracias por la atención prestada durante la reunión que se sostuvo. Le escribimos para solicitarle formalmente sus comentarios sobre la exposición que realizamos y sobre los archivos que le fueron alcanzados, refiriéndonos a las diapositivas y al Anexo N°7 y el Anexo N8 de nuestro trabajo de tesis.

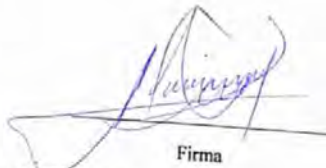
Sin más, quedamos atentos a su opinión basada en su experiencia dentro proyectos de infraestructura vial en los que participó.

Gracias.

Atte. Bach. Angello Gabriel Román Arias y Bach. Josue Arturo Aguilar Cano.

Comentario:

Al tener conocimiento y tras haber analizado el tema de tesis alcanzado por Angello Román Arias y Josué Aguilar Cano, se denota que la propuesta del método de análisis multicriterio es más beneficioso. Con mi experiencia profesional como consultor, supervisor y residente de obras viales puedo confirmar que suele suceder las constantes correcciones del expediente técnico en este tipo de obras. Y como hacen mención los bachilleres, si es posible anticipar la mayor cantidad de ámbitos o aspectos que pueden generar consecuencias en la ejecución, entonces se vuelve muy conveniente y atractivo ya que se espera que las correcciones sean menores. También, viéndolo desde el aspecto de la viabilidad, si se puede configurar las pendientes por donde pase el trazo y minimizar la longitud, no habría problema y tranquilamente puede ser una alternativa viable. Sin más que agregar, siento con satisfacción que el trabajo que presentarán es un buen aporte que nos permite comparar las rutas preliminares obtenidas por diferentes métodos. Termino deseando a los señores Román y Aguilar los mejores éxitos personales y en su futuro como profesionales.



Firma

Nombres y apellidos: Gerardo Velasco Pacheco

CIP: 53088

Estimado ingeniero (a),

Le escribe los bachilleres Angello Román Arias y Josue Aguilar Cano, de la facultad de Ingeniería Civil de la Pontificia Universidad Católica del Perú. Antes de todo, muchas gracias por la atención prestada durante la reunión que se sostuvo. Le escribimos para solicitarle formalmente sus comentarios sobre la exposición que realizamos y sobre los archivos que le fueron alcanzados, refiriéndonos a las diapositivas y al Anexo N°7 y el Anexo N8 de nuestro trabajo de tesis.

Sin más, quedamos atentos a su opinión basada en su experiencia dentro proyectos de infraestructura vial en los que participó.

Gracias.

Atte. Bach. Angello Gabriel Román Arias y Bach. Josue Arturo Aguilar Cano.

Comentario:

Los bachilleres en Ingeniería Civil Angello Gabriel Román Arias y Josué Arturo Aguilar Cano expusieron su tesis "Propuesta de aplicación del método de análisis multicriterio con el software ArcGIS, para la selección eficiente de la ruta preliminar de la Vía de Evitamiento de la ciudad de Abancay". Y al tener algo de conocimiento de metodologías de análisis multicriterio, creo que es un tema importante para comparar alternativas, y su aplicabilidad en software para poder definir una propuesta más eficiente, lo vuelve sumamente ventajoso frente a la línea de gradiente.

Teniendo en cuenta la complejidad y la mayor cantidad de procesos que los métodos de análisis multicriterio exigen, considero que es muy laborioso, pero ello puede ser llevado a cabo durante las etapas iniciales de una vía por diferentes especialistas en SIG. Considero este tema de relevancia para la infraestructura vial del país, porque puede ayudar a evitar problemas que se suelen encontrar durante los diseños a nivel de detalle y también durante la ejecución de obra.

Sin más, muchos éxitos a los señores Bachilleres Angello Román Arias y Josué Aguilar Cano.



Firma

Nombres y apellidos: Walter Francisco Olivera Marocho

CIP: 61890