

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA



Tesis profesional:

**ANÁLISIS CINEMÁTICO ESTRUCTURAL DEL ÁREA COMPRENDIDA AL
NORESTE DE NAMORA, CAJAMARCA - SUROESTE DE OXAMARCA,
CELENDÍN**

Para optar el título profesional de:

INGENIERO GEÓLOGO

Presentado por:

Bach. LUIS GONZALO LOZANO LAMADRID

Asesor:

Dr. ALEJANDRO CLAUDIO LAGOS MANRIQUE

CAJAMARCA – PERÚ

2021

DEDICATORIA

Al cimiento de mi formación, mi familia, que ha sido mi ejemplo, guía y soporte; que me mostraron el camino para llegar hasta donde estoy y me acompañaron en el todo el proceso. A todos y cada uno de ustedes va dedicada esta tesis profesional.

AGRADECIMIENTO

Agradezco en primer lugar a mi alma mater, la Universidad Nacional de Cajamarca, en especial a mi Escuela Académico Profesional de Ingeniería Geológica; por estos 5 años de cobijo y por darme las herramientas necesarias para llevar a cabo esta investigación. De igual manera quiero agradecer a mis docentes quienes compartieron sus conocimientos y ayudaron en mi formación como profesional; y sin su ayuda no se hubiese podido arribar a estos resultados. Gracias por sus enseñanzas.

Finalmente agradezco a mi asesor Dr. Alejandro Claudio Lagos Manrique, por su asesoramiento, orientación y sugerencias; y al jurado calificador por su enorme contribución final en la culminación de esta tesis profesional.

Bach. Luis Gonzalo Lozano Lamadrid

ÍNDICE DE CONTENIDO

	Pág.
DEDICATORIA.....	ii
AGRADECIMIENTO	iii
ÍNDICE DE FIGURAS	x
ÍNDICE DE FOTOS.....	xvii
ÍNDICE DE TABLAS.....	xx
ABREVIATURAS	xxiv
RESUMEN.....	xxvi
ABSTRACT	xxvii

CAPÍTULO I.

INTRODUCCIÓN.....	1
-------------------	---

CAPÍTULO II.

MARCO TEÓRICO	3
2.1. ANTECEDENTES TEÓRICOS DE LA INVESTIGACIÓN.....	3
2.2. BASES TEÓRICAS.....	4
2.2.1. Cinemática.....	4
2.2.2. Reología.....	4
2.2.3. Deformación.....	5

	Pág.
2.2.4. Estructuras Geológicas.....	9
2.2.5. Fracturas.....	10
2.2.6. Diaclasas.....	10
2.2.7. Fallas.....	13
2.2.8. Clasificación de las fallas.....	17
2.2.9. Diedros Rectos.....	20
2.2.10. Zonas de cizallamiento.....	20
2.2.11. Pliegues.....	21
2.2.12. Clasificación de pliegues.....	23
2.2.13. Clivaje.....	26
2.2.14. Lineamientos.....	28
2.2.15. Principios Geológicos.....	28
2.3. DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS.....	28

CAPÍTULO III.

MATERIALES Y MÉTODOS.....	30
3.1. UBICACIÓN Y ACCESIBILIDAD.....	30
3.1.1. Ubicación Política.....	30
3.1.2. Ubicación Geográfica.....	30
3.1.3. Accesibilidad.....	31
3.1.4. Geomorfología.....	33
3.1.5. Geología Local.....	35
3.2. METODOLOGÍA.....	40
3.2.1. Tipo, nivel, diseño y método de investigación.....	40

	Pág.
3.2.2. Población de estudio.....	41
3.2.3. Muestra.....	41
3.2.4. Unidad de análisis.	41
3.3. TÉCNICAS E INSTRUMENTACIÓN DE RECOLECCIÓN DE DATOS.....	41
3.3.1. Técnicas.....	41
3.3.2. Instrumentos de recolección de datos.....	42
3.3.3. Identificación de variables.....	44
3.4. PROCEDIMIENTO.	44
3.4.1. Etapa de planificación.	44
3.4.2. Primera etapa de gabinete.....	44
3.4.3. Etapa de campo.	45
3.4.4. Segunda etapa de gabinete.	45
3.5. ANÁLISIS DE IMÁGENES SATELITALES.....	46
3.5.1. Análisis de imágenes Landsat.	46
3.5.2. Interpretación de Imágenes Satelitales 3D con GE.	54
3.6. DIACLASAS.....	54
3.6.1. Estación D-01.....	55
3.6.2. Estación D-02.....	56
3.6.3. Estación D-03.....	57
3.6.4. Estación D-04.....	58
3.6.5. Estación D-05.....	59
3.6.6. Estación D-06.....	60
3.6.7. Estación D-07.....	61

	Pág.
3.6.8. Estación D-08.....	62
3.6.9. Estación D-09.....	63
3.6.10. Estación D-10.....	64
3.6.11. Estación D-11.....	65
3.6.12. Estación D-12.....	66
3.7. FALLAS.....	67
3.7.1. Estación F-01.....	67
3.7.2. Estación F-02.....	70
3.7.3. Estación F-03.....	72
3.7.4. Estación F-04.....	74
3.7.5. Estación F-05.....	75
3.7.6. Estación F-06.....	77
3.7.7. Estación F-07.....	78
3.7.8. Estación F-08.....	79
3.7.9. Estación F-09.....	80
3.7.10. Estación F-10.....	81
3.7.11. Estación F-11.....	83
3.7.12. Estación F-12.....	84
3.7.13. Estación F-13.....	86
3.8. PLIEGUES.....	90
3.8.1. Estación P-01.....	90
3.8.2. Estación P-02.....	92
3.8.3. Estación P-03.....	95
3.8.4. Estación P-04.....	97
3.8.5. Estación P-05.....	99

	Pág.
3.8.6. Estación P-06.....	100
3.9. INDICADORES CINEMÁTICOS.....	103
3.9.1. Fracturas extensionales en echelón.	103
3.9.2. Fracturas extensionales.....	104
3.9.3. Clivaje tectónico.....	105

CAPÍTULO IV.

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	107
4.1. ANÁLISIS DE LINEAMIENTOS.....	107
4.2. ANÁLISIS CINEMÁTICO DE LA DEFORMACIÓN FRÁGIL.	109
4.2.1. Análisis de fallas.	109
4.2.2. Análisis de las diaclasas.	120
4.3. ANÁLISIS CINEMÁTICO DE LA DEFORMACIÓN DÚLTI.	121
4.4. ANÁLISIS DE INDICADORES CINEMÁTICOS.....	121
4.4.1. Análisis de Foliaciones.....	122
4.4.2. Análisis de Fracturas extensionales en echelón.	122
4.4.3. Análisis de fracturas extensionales.....	122

CAPÍTULO V.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	124
5.1. CONCLUSIONES.....	124

	Pág.
5.2. RECOMENDACIONES.....	125
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	126
ANEXOS.....	131

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. (a) División en los tres componentes independientes de la deformación: (b) Distorsión, (c) Rotación y (d) Traslación.....	6
Figura 2. Diagrama esfuerzo-deformación.	8
Figura 3. Elipsoide de deformación, donde sus tres vectores e_1 , e_2 y e_3 definen a los ejes principales de deformación.....	9
Figura 4. Orientación de fracturas respecto a los esfuerzos principales durante la compresión.....	10
Figura 5. Elementos principales de una falla (normal).	15
Figura 6. Sentido del movimiento determinado por la relación geométrica oblicua entre el plano de falla y de Riedel.....	16
Figura 7. Gráfico esquemático de fibras y planos de recristalización.....	17
Figura 8. Fractura de tensión tipo T.....	17
Figura 9. (a) Falla Normal. (b) Falla Inversa. (c) Falla de Rumbo. (d) Falla Vertical, baja el bloque oriental. (e) Falla Vertical, baja el bloque occidental. (f) Falla Sinistral Normal.(g) Falla Sinistral Inversa.....	19
Figura 10. Falla Rotacional.....	20
Figura 11. Deformación progresiva en una zona de cizalla. a) Venillas rellenas de mineral. B) Venillas plegadas y rotadas. C) Nuevo sistema de venillas.....	21
Figura 12. Esquema idealizado de las partes de un pliegue simétrico.	22
Figura 13. Tipos de pliegues atendiendo a la inclinación del plano axial. a) Simétrico. b) Asimétrico. c) Volcado. d) Recumbente.....	23

Figura 14. Tipos de pliegues de acuerdo a su forma. a) Anticlinal y sinclinal. b) Pliegue Monoclinal. c) Isoclinal. d) Pliegue en caja. e) Pliegue en Abanico. f) Pliegue Chevron.....	24
Figura 15. a) Geometría de pliegue. A – E son puntos de medición, $\pi_A - \pi_E$ son polos a la estratificación. b) Eje (eje π) determinado a partir de un estereograma.....	25
Figura 16. Geometría de Pliegue Cónico. a) Forma de una capa cónica plegada. b) Proyección de estereograma del hemisferio inferior de un pliegue cónico.....	26
Figura 17. La relación entre el clivaje y el plegamiento. Las flechas negras dan sentido de vergencia.....	27
Figura 18. Ubicación política. a) Provincias: Cajamarca, Celendín y San Marcos, con sus respectivos distritos. b) Área de investigación.....	30
Figura 19. Imagen satelital donde se muestra las dos rutas principales a Huanico.	35
Figura 20. Instrumentos y equipos usados para recolección de datos.....	43
Figura 21. a) Imagen Landsat 8, Path 009 y Row 068. b) Área de tesis.	46
Figura 22. a) Imagen Landsat 8 en ND. b) Radiancia. c) Reflectancia.....	47
Figura 23. Imagen Landsat 8 con el filtro High Pass de Convolución y Morfología, con kernel de 5.....	48
Figura 24. Imagen Landsat 8 con filtros direccionales. a) Imagen con Filtro Direccional a 0°. b) Imagen con Filtro direccional a 45°	49
Figura 25. Lineamientos E-W, extraídos del Filtro de High Pass, 2021.....	49
Figura 26. Lineamientos N-S, extraídos del Filtro de High Pass, 2021.....	50

	Pág.
Figura 27. Lineamientos NE-SW, extraídos del Filtro de High Pass, 2021.....	50
Figura 28. Lineamientos totales, extraídos del Filtro de High Pass, 2021.....	51
Figura 29. Lineamientos N-S extraídos del Filtro direccional. a) Lineamientos del Filtro direccional a 0°. b) Lineamientos del Filtro direccional a 45°.....	51
Figura 30. Lineamientos E-W extraídos del Filtro direccional. a) Lineamientos del Filtro direccional a 0°. b) Lineamientos del Filtro direccional a 45°.....	52
Figura 31. Lineamientos NW-SE extraídos del Filtro direccional. a) Lineamientos del Filtro direccional a 0°. b) Lineamientos del Filtro direccional a 45°.....	52
Figura 32. Lineamientos totales del Filtro Direccional a 0°.....	53
Figura 33. Lineamientos totales del Filtro Direccional a 45°.....	53
Figura 34. Estructuras Geológicas en Imagen GE, 2021. En rojo fallas inversas y en amarillo pliegues sinclinal y anticlinal.....	54
Figura 35. Concentración de Fisher de las diaclasas de la estación D-01.....	55
Figura 36. Concentración de Fisher de las diaclasas de la estación D-02.....	56
Figura 37. Concentración de Fisher de las diaclasas de la estación D-03.....	58
Figura 38. Concentración de Fisher de las diaclasas de la estación D-04.....	59
Figura 39. Concentración de Fisher de las diaclasas de la estación D-05.....	60
Figura 40. Concentración de Fisher de las diaclasas de la estación D-06.....	61
Figura 41. Concentración de Fisher de las diaclasas de la estación D-07.....	62
Figura 42. Concentración de Fisher de las diaclasas de la estación D-08.....	63
Figura 43. Concentración de Fisher de las diaclasas de la estación D-09.....	64

	Pág.
Figura 44. Concentración de Fisher de las diaclasas de la estación D-10.....	65
Figura 45. Concentración de Fisher de las diaclasas de la estación D-11.....	66
Figura 46. Concentración de Fisher de las diaclasas de la estación D-12.....	67
Figura 47. Red de Smith con la dirección de ejes principales de deformación de la Falla Inversa de la estación F-02.....	71
Figura 48. Red de Smith con la dirección de ejes principales de deformación de la Falla Inversa.....	73
Figura 49. Componente sinistral interpretada a partir de foliaciones (Falla Inversa-Sinistral de color rojo, Foliaciones de color negro).....	76
Figura 50. Red de Smith con la dirección de ejes principales de deformación de las Fallas Inversa Sinistrales de las estaciones F-05 y F-06.....	78
Figura 51. Fallas de Rumbo Sinistral. Imagen extraída de SAS Planet, 2021.	80
Figura 52. Red de Smith con la dirección de ejes principales de deformación de la Falla Normal con componente sinistral.....	82
Figura 53. Red de Smith con la dirección de ejes principales de deformación de la Falla Inversa de la estación F-11.....	83
Figura 54. Red de Smith con la dirección de ejes principales de deformación de la Falla Inversa-sinistral de la estación F-12.....	85
Figura 55. Red de Smith con la dirección de ejes principales de deformación de la Falla Inversa.....	88
Figura 56. Red de Smith con la dirección de ejes principales de deformación de la Falla Normal.....	89

	Pág.
Figura 57. Estratos del Sinclinal Volcado de la estación P-01, ploteados en la Red de Wulff.....	91
Figura 58. Polos de los estratos del Sinclinal Volcado de la estación P-01, ploteados en la Red de Wulff.....	92
Figura 59. Estratos del Anticlinal Asimétrico en la estación P-02, ploteados en la Red de Wulff.....	94
Figura 60. Polos de los estratos del Anticlinal Asimétrico de la estación P-02, ploteados en la Red de Wulff.....	94
Figura 61. Estratos del Sinclinal Asimétrico de la estación P-03, ploteados en la Red de Wulff.....	96
Figura 62. Polos de los estratos del Sinclinal Asimétrico de la estación P-03, ploteados en la Red de Wulff.....	96
Figura 63. Estratos del anticlinal Asimétrico de la estación P-04, ploteados en la Red de Wulff.....	98
Figura 64. Polos de los estratos del Sinclinal Asimétrico de la estación P-04, ploteados en la Red de Wulff.....	98
Figura 65. Estratos del Sinclinal Asimétrico de la estación P-05, ploteados en la Red de Wulff.....	99
Figura 66. Polos de los estratos del Sinclinal Asimétrico de la estación P-05, ploteados en la Red de Wulff.....	100
Figura 67. Estratos del Sinclinal Volcado de la estación P-06, ploteados en la Red de Wulff.....	101
Figura 68. Polos de los estratos del Sinclinal Asimétrico de la estación P-06, ploteados en la Red de Wulff.....	102

	Pág.
Figura 69. Sinclinal Volcado en cuyo núcleo aflora la Formación Cajamarca. Imagen extraída de Google Earth, 2021.	102
Figura 70. A) Fracturas extensionales en echelón, rellenas de calcita. B) Cinemática de la zona de cizalla; extensión (fechas amarillas) y compresión (fechas rojas).....	104
Figura 71. Lineamientos totales unidos y corregidos.....	107
Figura 72. Delimitación de fallas por agrupación de lineamientos.....	108
Figura 73. Análisis de la compresión de la estación F-02 por el método de los Diedros Rectos.....	109
Figura 74. Análisis de la compresión de la estación F-03 por el método de los Diedros Rectos.....	110
Figura 75. Análisis de compresión de las estaciones F-05 y F-06 por el método de los Diedros Rectos.....	111
Figura 76. Estructuras resultantes del movimiento de las fallas regionales de las estaciones F-05 y F-06.....	112
Figura 77. Análisis de la extensión de la estación F-10, por el método de los Diedros Rectos.....	112
Figura 78. Análisis de la compresión en la estación F-11, por el método de los Diedros Rectos.....	113
Figura 79. Análisis de la compresión en la estación F-12, por el método de los Diedros Rectos.....	114
Figura 80. Análisis de la compresión de la Falla Inversa de la estación F-13, por medio de Diedros Rectos.....	115

	Pág.
Figura 81. Análisis de la extensión en la Falla Normal de la estación F-13, por medio de Diedros Rectos.....	115
Figura 82. Análisis de la cinemática de la deformación, por medio de Diedros Rectos, del Primer Evento Tectónico reconocido (Fase Inca I).....	116
Figura 83. Análisis de la cinemática de la deformación, por medio de Diedros Rectos, del Segundo Evento Tectónico (Extensión Local).....	117
Figura 84. Análisis de la cinemática de la deformación, por medio de Diedros Rectos, del Tercer Evento Tectónico (Fase Inca II).....	118
Figura 85. Análisis de la cinemática de la deformación, por medio de Diedros Rectos, del Cuarto Evento Tectónico (Fase Inca III).....	119

ÍNDICE DE FOTOS

	Pág.
Foto 1. Cerro Patillo, ubicado en el Sector la Amistad.	31
Foto 2. a) Afloramiento de areniscas de la Formación Inca. b) Muestra de mano de arenisca ferruginosa.	35
Foto 3. a) Calizas nodulares de la Formación Chúlec. b) Acercamiento a calizas nodulares arenosas.	36
Foto 4. a) Intercalación de Calizas y arcillitas grises de la Formación Pariatambo. b) Caliza bituminosa gris oscura. c) Arcillitas calcáreas.	37
Foto 5. a) Escarpes pronunciados de calizas de la Formación Yumagual. b) Acercamiento de la caliza gris parduzca.	37
Foto 6. a) Calizas gris parduzcas nodulares del miembro intermedio fossilífero de la Formación Yumagual. b) Derecha acercamiento a roca caliza con el fósil <i>Ostrea scypha</i>	38
Foto 7. Calizas nodulares de la Formación Quilquiñán Mujarrúm.	39
Foto 8. a) Estratos gruesos de calizas macizas de las Formación Cajamarca. b) Caliza gris azulada, con meteorización pardo amarillenta.	39
Foto 9. a) Afloramiento de la Formación Celendín. b) Acercamiento a la caliza margosa de color gris claro.	40
Foto 10. Escapes de Fallas Normales.	68
Foto 11. a) Fracturas Tensionales (color amarillo). b) Interpretación cinemática del fallamiento normal (vista de perfil).	69
Foto 12. Fracturas extensionales. A) Foto. B) Interpretación cinemática la extensión.	69
Foto 13. Falla inversa en calizas de la Formación Quilquiñán Mujarrúm.	70

Foto 14.	a) Planos de recristalización de CaCO_3 . b) Interpretación cinemática del fallamiento inverso.....	71
Foto 15.	a) Plano de recristalización de CaCO_3 con estrías de falla. b) Interpretación de la cinemática del fallamiento inverso (vista de perfil).	73
Foto 16.	Fallas Normales.....	75
Foto 17.	Falla Inversa-Sinestral (en color rojo), en vista de perfil, de la estación F-05.	76
Foto 18.	Vista de perfil, donde se observa la componente inversa de la Falla Inversa-Dextral de la estación F-06.....	77
Foto 19.	Fallas Normales de dirección NE-SW.	79
Foto 20.	a) Planos de recristalización de CaCO_3 . b) Interpretación cinemática del fallamiento inverso (Vista de perfil).....	81
Foto 21.	a) Plano de falla. b) Interpretación cinemática del fallamiento normal (vista de perfil).....	82
Foto 22.	a) Falla Inversa-Sinestral. b) Interpretación cinemática del fallamiento inverso (vista de perfil).....	85
Foto 23.	a) Fallas de la estación F-13. b) Falla Inversa. c) Falla Normal.....	87
Foto 24.	a) Plano de Falla Inversa con planos de recristalización de CaCO_3 . b) Interpretación cinemática del fallamiento inverso (vista de perfil).....	87
Foto 25.	a) Plano de falla Normal con planos de recristalización de CaCO_3 . b) Interpretación cinemática del fallamiento normal (vista de perfil).	88
Foto 26.	Sinclinal Volcado, cuyo núcleo es la Formación Celendín de la estación P-01	91

	Pág.
Foto 27. Anticlinal Asimétrico de la estación P-02.....	93
Foto 28. Sinclinal Asimétrico de la estación P-03.	95
Foto 29. Anticlinal Asimétrico de la estación P-04.....	97
Foto 30. a) Fracturas extensionales en echelón, rellenas de calcita. b) Interpretación cinemática del cizallamiento.	103
Foto 31. Fracturas extensionales con relleno de calcita (CaCO ₃).	105
Foto 33. Clivaje tectónico en calizas de la Formación Cajamarca.....	105

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Coordenadas de los vértices del área de estudio. El sistema WGS-84, UTM, zona 17S.....	31
Tabla 2. Rutas principales para llegar a Huanico..	33
Tabla 3. Descripción de Unidades Geomorfológicas.	33
Tabla 4. Operacionalización de las variables.....	44
Tabla 5. Coordenadas y datos estructurales de diaclasas en la estación D-01.....	55
Tabla 6. Coordenadas y datos estructurales de diaclasas en la estación D-02.....	56
Tabla 7. Coordenadas y datos estructurales de diaclasas en la estación D-03.....	57
Tabla 8. Coordenadas y datos estructurales de diaclasas en la estación D-04.....	58
Tabla 9. Coordenadas y datos estructurales de diaclasas en la estación D-05.....	59
Tabla 10. Coordenadas y datos estructurales de diaclasas en la estación D-06.....	60
Tabla 11. Coordenadas y datos estructurales de diaclasas en la estación D-07.....	61
Tabla 12. Coordenadas y datos estructurales de diaclasas en la estación D-08.....	62
Tabla 13. Coordenadas y datos estructurales de diaclasas en la estación D-09.....	63
Tabla 14. Coordenadas y datos estructurales de diaclasas en la estación D-10.....	64
Tabla 15. Coordenadas y datos estructurales de diaclasas en la estación D-11.....	65
Tabla 16. Coordenadas y datos estructurales de diaclasas en la estación D-12.....	66
Tabla 17. Coordenadas y datos estructurales de las Fallas Normales de la estación F-01.....	68
Tabla 18. Coordenadas y datos estructurales de la Falla Inversa de la estación F-02.....	70

	Pág.
Tabla 19. Ejes principales de deformación en la estación F-02.....	72
Tabla 20. Coordenadas y datos estructurales de las Fallas Inversas de la estación F-03.....	72
Tabla 21. Ejes principales de deformación de la estación F-03.....	74
Tabla 22. Coordenadas y datos estructurales de las Fallas Normales de la estación F-04.....	74
Tabla 23. Coordenadas y datos estructurales de la Falla Inversa-Sinestral de la estación F-05.....	75
Tabla 24. Coordenadas y datos estructurales de la Falla Inversa-Sinestral de la estación F-06.....	77
Tabla 25. Ejes principales de deformación en las estaciones F-05 y F-06.	78
Tabla 26. Coordenadas y datos estructurales de las Fallas Normales de la estación F-07.....	79
Tabla 27. Coordenadas y datos estructurales de las Fallas Sinestrales de la estación F-08.....	80
Tabla 28. Coordenadas y datos estructurales de la Falla Inversa de la estación F-09.....	80
Tabla 29. Coordenadas y datos estructurales de la Falla Normal de la estación F-10.....	81
Tabla 30. Ejes principales de deformación la estación F-10.	83
Tabla 31. Coordenadas y datos estructurales de la estación F-11.	83
Tabla 32. Ejes principales de deformación en la estación F-11.....	84

	Pág.
Tabla 33. Coordenadas y datos estructurales de las Fallas Inversa Sinestrales de la estación F-12.....	84
Tabla 34. Ejes principales de deformación de las Fallas Inversa Sinestrales de la estación F-12.....	86
Tabla 35. Coordenadas y datos estructurales de las fallas de la estación F-13.....	86
Tabla 36. Ejes principales de deformación de la Falla Inversa de la estación F-13.....	89
Tabla 37. Ejes principales de deformación de la Falla Normal de la estación F-13.....	89
Tabla 38. Datos estructurales de ambos flancos del sinclinal Volcado de la estación P-01.....	90
Tabla 39. Resumen de la clasificación del pliegue de la estación P-01.....	92
Tabla 40. Datos estructurales promedio de ambos flancos del Anticlinal Asimétrico de la estación P-02.....	93
Tabla 41. Resumen de la clasificación del pliegue de la estación P-02.....	95
Tabla 42. Datos estructurales promedio de ambos flancos del Sinclinal Asimétrico de la estación P-03.....	95
Tabla 43. Resumen de la clasificación del pliegue de la estación P-03.....	97
Tabla 44. Datos estructurales promedio de ambos flancos del Anticlinal Asimétrico de la estación P-04.....	97
Tabla 45. Resumen de la clasificación del pliegue de la estación P-04.....	99

Tabla 46.	Datos estructurales promedio de ambos flancos del Sinclinal Asimétrico de la estación P-05.....	99
Tabla 47.	Resumen de la clasificación del pliegue de la estación P-05.....	100
Tabla 48.	Datos estructurales promedio de ambos flancos del Sinclinal Volcado de la estación P-06.....	101
Tabla 49.	Resumen de la clasificación del pliegue de la estación P-06.....	102
Tabla 50.	Ejes principales de deformación del Primer Evento Tectónico.....	117
Tabla 51.	Ejes principales de deformación del Segundo Evento Tectónico.....	118
Tabla 52.	Ejes principales de deformación del Tercer Evento Tectónico.....	119
Tabla 53.	Ejes principales de deformación del Cuarto Evento Tectónico.....	120

ABREVIATURAS

Buz.	Buzamiento
Db	Diaclasa de buzamiento
Dd	Diaclasa diagonal
De	Diaclasa de estratificación
Dir.	Dirección
Dr	Diaclasa de rumbo
E	Este
e ₁	Eje de deformación principal mayor
e ₂	Eje de deformación principal intermedio
e ₃	Eje de deformación principal menor
et al.	Y otros
Fm.	Formación
GE	Google Earth
INGEMMET	Instituto Geológico Minero y Metalúrgico del Perú.
Ki-chu	Formación Chúlec
Ki-in	Formación Inca
Ki-pa	Formación Pariatambo
Ks-ca	Formación Cajamarca
Ks-ce	Formación Celendín
Ks-qm	Formación Quilquiñán Mujarrún
Ks-yu	Formación Yumagual
N	Norte
NE	Noreste
NW	Noroeste
ND	Nivel digital
Pág.	Páginas
S	Sur
SE	Sureste
SW	Suroeste
UTM	Universal transversal de Mercator
W	Oeste

WGS-84	Sistema Geodésico Mundial 1984
WRS	Sistema Mundial de Referencia
σ_1	Esfuerzo principal mayor
σ_2	Esfuerzo principal intermedio
σ_3	Esfuerzo principal menor

RESUMEN

El área comprendida al noreste del distrito de Namora y al suroeste del distrito de Oxamarca; carece de estudios que nos ayuden a entender la cinemática de las deformaciones; por lo que se realizó el análisis cinemático de las estructuras tectónicas. Para ello se planificó nueve salidas a campo en donde se identificó, caracterizó y se tomó los datos correspondientes de las estructuras. Posterior a ello, en gabinete, se trató la información de campo en los softwares Faulkin, Stereonet, Dips. Adicional a esto se realizó un análisis visual de imágenes satelitales, con Google Earth y Envi. Finalmente se hizo un análisis general de los resultados obtenidos y de la interpretación hecha en campo. Del análisis realizado se concluye que: la cinemática de la deformación posee una dirección principal NW-SE, el cual coincide con la dirección de la deformación andina. Se distinguieron cuatro eventos de deformación; el primer evento fue compresivo y correspondiente a la Fase Tectónica Inca I, en donde se formaron los plegamientos y algunas fallas inversas; el segundo evento tectónico, expandió localmente el sistema, formando fallas de cinemática normal en dirección NW-SE; el tercer evento tectónico, se lo asocia con la Fase Tectónica Inca II, el cual reactivó y creó fallas de cinemática inversa y replegó pliegues previos; el último evento también reactivó fallas a una cinemática inversa-sinistral, creó zonas de extensión local y continuó con el replegamiento, a este evento se lo correlacionó con la Fase Tectónica Inca III.

Palabras clave: Análisis cinemático, estructuras, deformación, reología y sistema de fallas.

ABSTRACT

The area comprised northeast of the district of Namora and southwest of the district of Oxamarca; it lacks studies that help us understand the kinematics of deformations; Therefore, the kinematic analysis of the tectonic structures was carried out. For this, nine field trips were planned where the corresponding data of the structures was identified, characterized and taken. After that, in the cabinet, the field information was treated in the Faulkin, Stereonet, Dips softwares. In addition to this, a visual analysis of satellite images was carried out, with Google Earth and Envi. Finally, a general analysis of the results obtained and the interpretation made in the field was made. From the analysis carried out, it is concluded that: the kinematics of the deformation has a main direction NW-SE, which coincides with the direction of the Andean deformation. Four deformation events were distinguished; the first event was compressive and corresponding to the Inca Tectonic Phase I, where the folds and some reverse faults were formed; the second tectonic event locally expanded the system, forming normal kinematic faults in a NW-SE direction; the third tectonic event is associated with the Inca Tectonic Phase II, which reactivated and created inverse kinematics faults and folded previous folds; the last event also reactivated faults to a sinistral-inverse kinematics, created local extension zones and continued with the refolding, this event was correlated with the Inca Tectonic Phase III.

Keywords: Kinematic analysis, structures, deformation, rheology and fault system

CAPÍTULO I.

INTRODUCCIÓN

Los Andes peruanos han estado expuestos a múltiples eventos de deformación producidos por la tectónica de placas; es decir, la subducción de Placa Nazca por debajo de la Placa Sudamericana. Estos eventos han deformado, en una dirección preferente, a las rocas preexistentes creando estructuras secundarias como fallas, pliegues y diaclasas. En el área de estudio afloran estructuras tectónicas, emplazadas en su mayoría en rocas carbonatadas del Cretácico, estas proporcionan la base para entender a los eventos de deformación; los cuales modificaron el sistema a lo largo de los años y junto con la erosión dan la configuración con la que se las divisa en la actualidad.

Para entender a las estructuras tectónicas recurrimos a la Geología Estructural, la cual estudia la forma, distribución y los procesos que generaron a estas estructuras. Esta rama de la Geología tiene subdivisiones o niveles, los cuales permiten un mejor entendimiento de las estructuras tectónicas. La zona de investigación posee un estudio descriptivo; pero carece de estudios que nos permitan entender los movimientos de la deformación; es por ello que se recurrió al análisis cinemático, en el cual determinará los caminos que siguió la deformación o los movimientos que siguió la roca desde un estado no deformado a uno deformado; para así lograr tener un mayor entendimiento de las deformaciones. Por todo esto, el siguiente trabajo de investigación realizó el análisis cinemático estructural, con el fin de entender la cinemática deformacional que sufrieron las rocas sedimentarias; para lo cual se debe resolver la siguiente pregunta:

¿Cuál es la cinemática deformacional de las rocas sedimentarias que afloran en el área comprendida al noreste de Namora, Cajamarca - suroeste de Oxamarca, Celendín?

Como hipótesis que responde a esta interrogante se ha planteado que el análisis cinemático estructural del área comprendida al noreste de Namora, Cajamarca - suroeste de Oxamarca, Celendín; revela que las fallas, pliegues y diaclasas tectónicas; se deformaron en dirección NW-SE, la cual es la dirección de la deformación andina; y esta es generada por eventos compresionales de dirección NE-SW, la cual coincide con la dirección del movimiento de subducción de la Placa de Nazca debajo de la Placa Sudamericana. Dicha compresión a su vez generó zonas de extensión locales.

Esta investigación se realizó porque el área comprendida al noreste de Namora, Cajamarca - suroeste de Oxamarca, Celendín, carece de estudios que nos permitan entender la cinemática estructural que tuvieron las rocas preexistentes durante su evolución tectónica. Además, se hará esta investigación para generar conocimiento que sirva como base a geólogos en futuros proyectos de exploración geológica o que sirvan a ingenieros civiles o geotecnistas para futuros proyectos de construcción.

En cuanto a la delimitación de la investigación, esta se realizó en el área comprendida al noreste de Namora, Cajamarca y al suroeste de Oxamarca, Celendín; abarcando una extensión de 36 km².

Por todo lo expuesto se planeó como objetivo general:

Analizar la cinemática de las estructuras tectónicas presentes en el área comprendida al noreste de Namora, Cajamarca - suroeste de Oxamarca, Celendín.

Y para alcanzar este objetivo general, se han planteado los siguientes objetivos específicos:

Caracterizar a las estructuras tectónicas que afloran en la zona de trabajo.

Identificar la dirección de la deformación tectónica.

Interpretar las etapas de movimientos tectónicos.

Elaborar mapa cinemático, geológico y estructural a escala 1/25,000.

Elaborar perfiles geológico-estructural.

El presente documento está dividido en cinco capítulos: el primero es la introducción de la tesis, en donde se abarca el contexto, el problema, la justificación, los alcances, los objetivos y la descripción de los contenidos de los capítulos de la investigación. El segundo capítulo registra el contenido teórico y conceptual con el cual se ha desarrollado la investigación. En tercer capítulo corresponde a la descripción de los materiales, métodos usados para el procedimiento óptimo del desarrollo de la tesis, instrumentos de recolección de datos y los resultados obtenidos. El cuarto capítulo, se basa en el análisis y discusión de resultados obtenidos a lo largo de la investigación. Finalmente, el quinto capítulo trata de las conclusiones derivadas de los resultados obtenidos y de las recomendaciones para seguir ampliando el conocimiento sobre el problema de investigación.

CAPÍTULO II.

MARCO TEÓRICO

2.1. ANTECEDENTES TEÓRICOS DE LA INVESTIGACIÓN.

Bardales (2014). Realiza un análisis de estructuras tectónicas principales de la secuencia Cretácea en los Baños del Inca y alrededores. Dicho análisis lo realizó a dos escalas: a escala macroestructural, a través de imágenes aéreas, satelitales, modelo digital de terreno y vistas en 3D; y a escala mesoestructural, a través de datos tomados en campo de estructuras geológicas y cálculo de paleoesfuerzos.

Tapia (2010). Estableció un modelo estructural e interpretó la evolución estructural del sector occidental de la faja plegada y corrida de Malargüe, con el objetivo de entender la arquitectura del Orógeno andino en esa zona y compararlo con lo reportado en otras latitudes. Él estableció tres eventos de deformación; la inmersión de la cuenca, el comienzo de la faja plegada y corrida de Malargüe, y la deformación fuera de secuencia.

Chuquiruna (2009). Tesis Caracterización estratigráfica y estructural de la subcuenca Chonta – Cajamarca, mediante aplicaciones SIG. Realiza un modelo geológico-estructural de la subcuenca Chonta.

Parada (2008). Generó un modelo estructural que caracterizó la arquitectura para el borde oriental de la cuenca terciaria de abanico en el Valle del río Teno y la secuencia de deformación. Para ello utilizó los métodos de Geología de Campo y de construcción de secciones. En base a esto propuso que hubo una deformación polifásica que comprende al menos cuatro eventos; el primer y segundo evento fueron compresivos, el tercero fue extensional y el último fue compresivo.

Reyes (1980). Analiza regionalmente a las formaciones existentes en los cuadrángulos de Cajamarca, San Marcos y Cajabamba (Hojas 15-f, 15-g y 16-g), realizando el primer cartografiado a escala 1:100000; a su vez nos explica la evolución geológica, desde el Grupo Mitu hasta los depósitos recientes. Así mismo en el plano elaborado (15-g), se observan estructuras, en área de estudio, de carácter regional como fallas y pliegues.

2.2. BASES TEÓRICAS.

2.2.1. Cinemática.

La palabra cinemática proviene del griego kinema que significa movimiento (Fossen 2010). La descripción del movimiento responsable de la deformación es el ámbito de la cinemática, una rama de la mecánica relacionada con la trayectoria de movimiento agregado de un volumen 3D de material y las trayectorias de movimiento individuales de puntos discretos dentro del volumen (Davis, Reynolds y Klunt 2012).

La cinemática se lleva a cabo como análisis descriptivo, sin referencia a las fuerzas que realmente causaron o están causando el movimiento; la cinemática simplemente se centra en los movimientos (Davis et al. 2012). La descripción geométrica forma las bases para el análisis cinemático, que se refiere a como se ha movido las partículas de roca durante la deformación (Fossen 2010).

Para estudiar la cinemática nos valemos del análisis cinemático que es la determinación de caminos de los movimientos que la roca o parte de las rocas que han tomado durante la transformación del estado no deformado al deformado (Van Der Pluijm y Marshak 2004). Este análisis permite al geólogo estructural caracterizar cuantitativamente la deformación general o el patrón de movimiento resultante de los movimientos de falla acumulativos en una región y determinar la dirección de la reducción o extensión masiva (Rowland, Duebendorfer y Schiefelbein 2007). Del análisis cinemático surgen los modelos cinemáticos y estos representan descripciones simplificadas de los procesos mecánicos que forman estructuras (Groshong 2012).

2.2.2. Reología.

Para entender el comportamiento de las rocas frente a la aplicación de esfuerzos es necesario acudir a la Reología, que es la parte de la Mecánica de los medios continuos que estudia el flujo de materia (Fernández, Díaz y Díaz 2017). En ciencia de los materiales y geología, utilizamos el término reología (del griego reos, que significa "corriente" o "flujo") para describir la capacidad de los materiales sometidos a esfuerzos para deformarse o fluir, utilizando parámetros fundamentales como la tasa de deformación, elasticidad y viscosidad (Van Der Pluijm y Marshak 2004).

Cuando se ven a escalas geológicas de tiempo y dimensión espacial, las rocas deben considerarse como materiales casi sin resistencia, capaces de deformarse continuamente

incluso bajo la más mínima presión (Davis et al. 2012). Una roca que se fractura a bajas temperaturas puede fluir como el jarabe a temperaturas más altas, y una roca que se fractura cuando es golpeada por un martillo puede fluir a bajas tasas de deformación (Fossen 2010).

2.2.3. Deformación.

Las rocas deformadas, sus estructuras y fábricas pueden estudiarse y cartografiarse; cada estructura refleja un cambio de forma y quizás transporte dentro de un marco de referencia dado; en este contexto nos referimos a estos cambios como deformación (Fossen 2010). La deformación describe los desplazamientos colectivos de los puntos de un cuerpo; en otras palabras, describe la completa transformación de la geometría de un cuerpo inicial a la final (Van Der Pluijm y Marshak 2004).

No podemos saber si un cuerpo rocoso se ha movido o distorsionado a menos que sepamos dónde estaba originalmente y cuál era su forma original. Idealmente, si conocemos tanto la posición original como la final de una matriz de puntos en un cuerpo de roca, podemos describir una deformación con precisión matemática definiendo una transformación de coordenadas; en muchas circunstancias reales, no tenemos un marco de referencia externo, por lo que solo podemos describir parcialmente una deformación (Van Der Pluijm y Marshak 2004). Por ejemplo, en rocas sedimentarias partimos de que en un principio los estratos eran horizontales. Un criterio muy útil para clasificar la deformación interna es en base a los resultados físicos; según esto, se puede clasificar en deformación frágil y deformación dúctil (Martínez 2003).

2.2.3.1. Componentes de la deformación.

- **Traslación.** La traslación mueve cada partícula en la roca en la misma dirección y la misma distancia, y su campo de desplazamiento consiste en vectores paralelos de igual longitud (Fossen 2010). Durante una traslación pura de cuerpo rígido se mantiene el tamaño y la forma original del cuerpo (Davis et al. 2012).
- **Rotación.** Durante la rotación de cuerpo rígido, un cuerpo cambia de orientación de una manera que puede describirse como una rotación de puntos de material alrededor de algún eje común (Davis et al. 2012).
- **Distorsión.** La distorsión resulta de la deformación del cuerpo no rígido, ya sea a través de un cambio de tamaño (dilatación) y/o un cambio de forma (distorsión) (Davis et al.

2012). Todo lo que podemos ver en el campo o en las muestras es distorsión (Fossen 2010). La distorsión es una variable más medible en campo que el esfuerzo; un análisis de distorsión (cinemático) brinda una mejor comprensión superficial de las estructuras que el análisis de esfuerzos (dinámicos), los cuales brindan una comprensión completa del desarrollo de estructuras (Peacock y Marrett 2000).

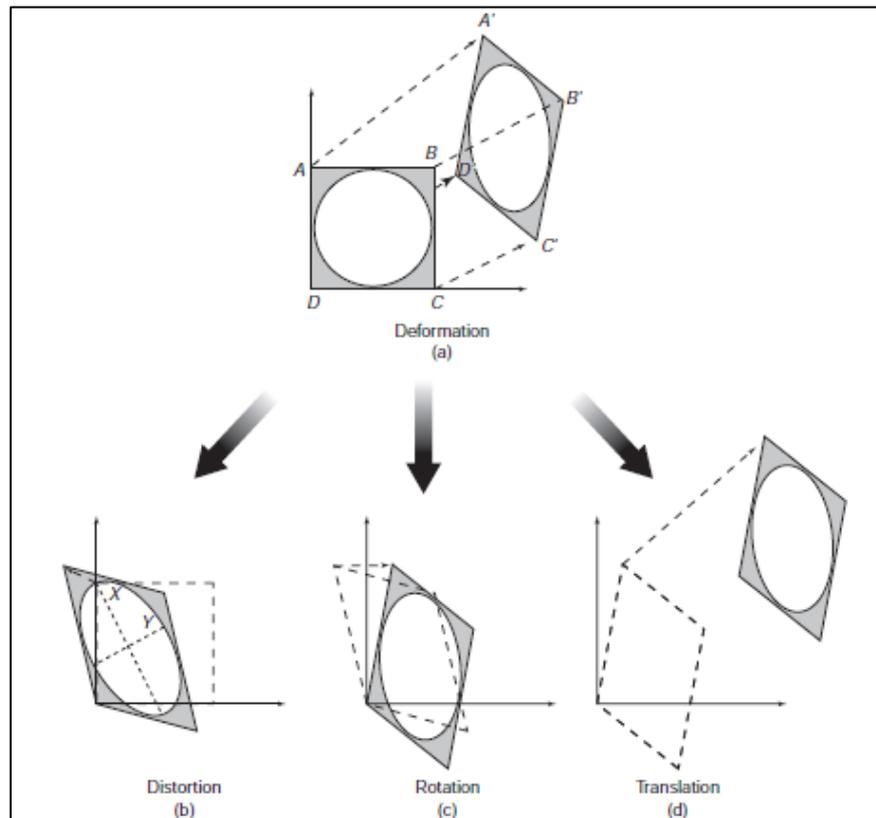


Figura 1. (a) División en los tres componentes independientes de la deformación: (b) Distorsión, (c) Rotación y (d) Traslación.

Fuente: Tomado de Van Der Pluijm y Marshak 2004.

2.2.3.2. Estados de deformación.

- Deformación elástica.

Si un cuerpo es sometido a fuerzas dirigidas, usualmente pasa por tres estados de deformación. Al principio la deformación es elástica; esto es, si cesa el esfuerzo, el cuerpo retorna a su forma y tamaño original; hay un esfuerzo extremo, llamado límite de elasticidad, si este es excedido, el cuerpo no retorna a su forma original; debajo de este límite, la deformación obedece la ley de Hooke, la cual establece que la deformación es proporcional al esfuerzo (Billings 1946).

- **Deformación plástica.**

El segundo estado es la deformación plástica y es cuando el esfuerzo excede al límite elástico, aquí, la muestra solo retorna parcialmente a su forma original, incluso si el esfuerzo es removido; siguiendo una secuencia y en un caso general, la deformación plástica sucede a la elástica al crecer los esfuerzos (Billings 1946). Si bien la teoría elástica puede funcionar bien para deformaciones muy pequeñas; en la corteza superior las rocas calentadas tienden a fluir y acumular deformación permanente, y a veces estas son muy grandes (Fossen 2010). La deformación plástica se define como deformación de volumen constante, dependiente del tiempo y de la temperatura (Suppe 2005).

Conforme aumenta el esfuerzo, el acortamiento es cada vez mayor; el punto en el cual la curva se aparta de una línea recta se conoce como el límite de proporcionalidad (Billings 1946). El campo de plasticidad aumenta con la presión confinante; cuando esta es lo muy grande, no llega a producir rotura incluso a deformaciones muy elevadas (Fernández et al. 2013).

- **Deformación frágil.**

Cuando continúa incrementándose el esfuerzo, una o más fracturas aparecen, y la muestra eventualmente falla por ruptura; esto es a lo que se denomina el tercer estado de deformación, que es la ruptura (Billings 1946). Aquí hemos entrando al campo de la deformación frágil; donde básicamente el esfuerzo llega a ser lo suficientemente grande como para estirar o doblar los enlaces químicos tanto que los átomos están demasiado separados para atraerse entre sí, entonces los enlaces se rompen, lo que resulta en la formación de una fractura o deslizamiento en una fractura preexistente (Van Der Pluijm y Marshak 2004).

La deformación frágil se define como una deformación fuertemente dependiente de la presión que implica un aumento en el volumen, como resultado de la fisuración. La fractura es el proceso de ruptura en pedazos, ya sea macroscópicamente o microscópicamente. Si las piezas encajan sin haber cambiado de forma, como con la porcelana, se llama fractura frágil; si las piezas no encajan, como con un alambre roto después de doblarlo mucho, se llama fractura dúctil (Suppe 2005).

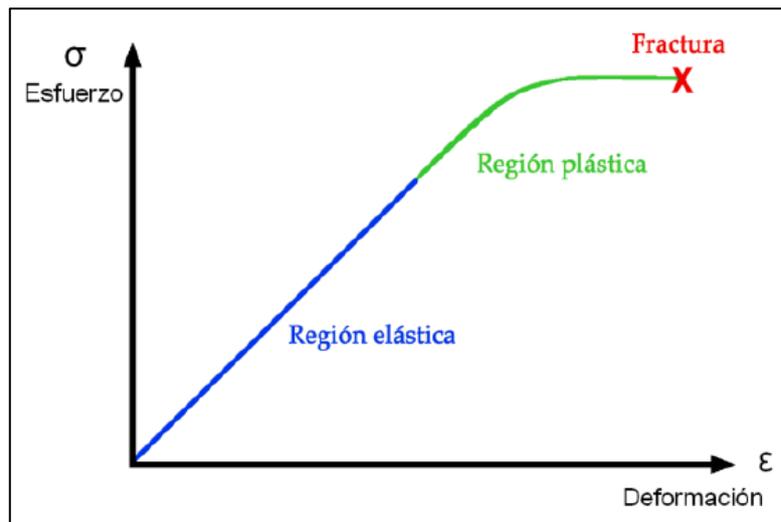


Figura 2. Diagrama esfuerzo-deformación.

Fuente: Tomado de Rivas 2005.

2.2.3.3. Elipsoide de deformación.

En dos dimensiones la deformación se define a través de una elipse, esta elipse describe la cantidad de elongación en cualquier dirección en un plano de deformación homogénea. El elipsoide de deformación es la forma deformada de una esfera imaginaria con un radio unitario que se deforma junto con el volumen de roca en consideración. Cuando el elipsoide se fija en el espacio, los ejes pueden considerarse vectores de longitudes y orientaciones dadas. El conocimiento de estos vectores significa, por lo tanto, el conocimiento de la forma y la orientación del elipsoide. Los vectores se denominan e_1 , e_2 y e_3 , donde e_1 es el más largo y e_3 el más corto (Fossen 2010). Las direcciones de los ejes se denominan direcciones principales de deformación y son perpendiculares entre sí; los tres planos perpendiculares entre sí que las contienen se llaman planos principales de deformación (Martínez 2003).

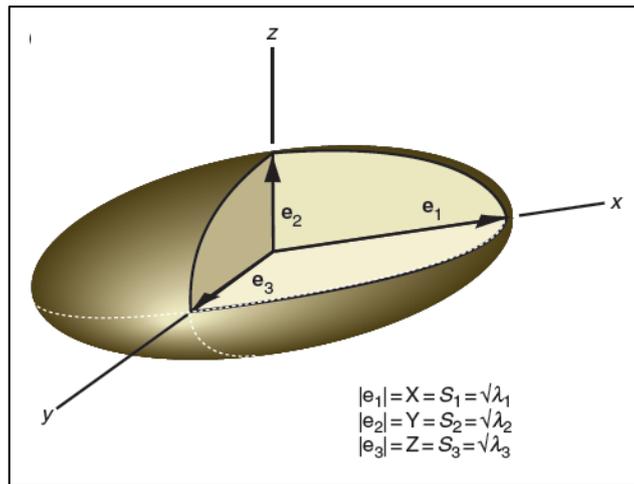


Figura 3. Elipsoide de deformación, donde sus tres vectores e_1 , e_2 y e_3 definen a los ejes principales de deformación.

Fuente: Tomado de Fossen 2010.

2.2.4. Estructuras Geológicas.

La palabra estructura se deriva del latín *struere*, que significa construir; por lo tanto, se podría decir que una estructura geológica es una configuración geométrica de rocas (Fossen 2010). Las estructuras geológicas que se han desarrollado a través de la deformación como respuesta a las fuerzas y esfuerzos asociados con los movimientos tectónicos de placas (Davis et al. 2012). Es el arreglo espacial y temporal particular que guardan los componentes rocosos. Las estructuras geológicas presentan características geométricas distintivas y otros rasgos de los que sobre salen: la forma, el tamaño, sus límites, sus relaciones, su orientación, tipo de material y su distribución geográfica (Trigueros 2018).

El examen de las cuestiones cinemáticas permite, ante todo, clasificar a las estructuras primarias, es decir, de formación simultánea a la de la propia roca; y en secundarias, surgidas como el resultado de deformaciones posteriores de las formas estructurales primarias (Belousov 1979). Debe agregarse que la geología estructural solo trata con estructuras creadas durante la deformación de la roca, no con estructuras primarias formadas por procesos sedimentarios o magmáticos; sin embargo, las estructuras de deformación pueden formarse a través de la modificación de estructuras primarias, como el plegamiento del estrato en una roca sedimentaria (Fossen 2010). Clásicamente, las estructuras secundarias se forman en rocas sedimentarias o ígneas después de la litificación, y en rocas metamórficas durante o después del metamorfismo (Davis et al. 2012).

2.2.5. Fracturas.

2.2.5.1. Fracturas de cizalla.

Las fracturas por cizallamiento muestran un deslizamiento paralelo a la fractura y generalmente se desarrollan a $20^\circ - 30^\circ$ a σ_1 , como se ve en numerosos experimentos bajo compresión confinada (Fossen 2010).

2.2.5.2. Fracturas de extensión.

Se desarrollan idealmente perpendiculares a σ_3 y, por lo tanto, contienen las tensiones principales intermedia y máxima ($2\theta = 0^\circ$). En términos de esfuerzos, se desarrollan perpendiculares a la dirección de extensión en condiciones de tracción y paralelas al eje de compresión durante las pruebas de compresión. Estas son típicas de la deformación a baja o nula presión de confinamiento, y se forman con bajo esfuerzo diferencial (Fossen 2010).

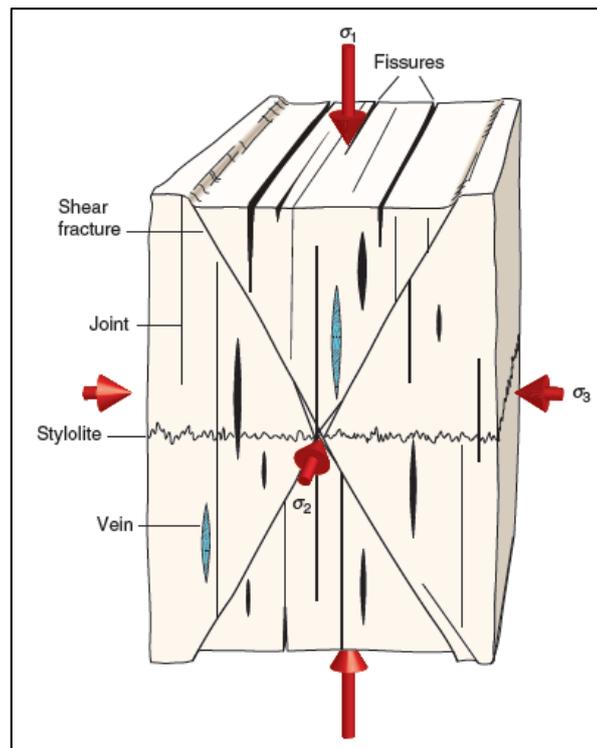


Figura 4. Orientación de fracturas respecto a los esfuerzos principales durante la compresión.

Fuente: Tomado de Fosseen 2010.

2.2.6. Diaclasas.

Son fracturas en las cuales no se producido ningún desplazamiento aparente, presentan una orientación aleatoria y la mayoría se produce en grupos aproximadamente paralelos

(Trigueros 2018). Las diaclasas son fracturas planas y lisas que cortan a las rocas perpendicularmente a la dirección en la que se estira el cuerpo o capa de roca, con un movimiento casi imperceptible (Davis et al. 2012). Las fracturas que tienen estrías de desgaste por fricción o una línea estilolítica se clasifican con fallas y uniones de solución, respectivamente (Hancock 1985).

Muchas diaclasas están compuestas por fracturas muy próximas dispuestas en escalones (en échelon), que los contienen en forma de rampa o, en exposiciones no alteradas, pueden exhibir una variedad de delicadas ondulaciones superficiales, todas las cuales son incompatibles con el deslizamiento por fricción a lo largo de la cara de la diaclasa (Suppe 2005). Las superficies de las diaclasas en las rocas sedimentarias en capas tienden a ser rectangulares, mientras que las diaclasas en los cuerpos de rocas masivas, como los plutones ígneos, varían de circulares a elípticas (Davis et al. 2012).

2.2.6.1. Tipos de diaclasas.

Las caras de las diaclasas, o incluso su rastro, rara vez se ven en su totalidad porque las superficies externas de la mayoría de las exposiciones a rocas están compuestas por una serie de caras de diaclasas que se cruzan y se juntan, así como planos de estratos, esquistosidades, fallas, superficies erosionadas y fracturas hechas por el hombre. Por esta razón, se conoce relativamente poco de las formas tridimensionales completas de las diaclasas. En cambio, la mayoría de los estudios de diaclasas se han centrado en las características más fáciles de observar, particularmente la orientación y el espaciado. Lo que más llama la atención de lo que es visible en las diaclasas, es su notable suavidad y su existencia en conjuntos casi paralelos que atraviesan otros conjuntos sin interacción o desplazamiento aparente. Las diaclasas pueden estar orientadas simétricamente con respecto a otras estructuras en el afloramiento; por ejemplo, pueden ser perpendiculares a la estratificación, ejes de pliegue o fábricas planares o lineales como el clivaje pizarroso (Suppe 2005).

Billings (1946) señala que, se puede realizar una clasificación de las diaclasas basándose en su geometría; él dijo que las diaclasas pueden ser clasificadas en base a su comportamiento relativo a la estratificación o una estructura similar en los estratos que pueden cortar. Las diaclasas de rumbo son aquellas de dirección paralela o esencialmente paralelas a la dirección del estrato, la esquistosidad de un esquistos o la estructura gnéisica. Las diaclasas de buzamiento son de dirección paralela o esencialmente paralela a la dirección en la que

buzas la estratificación, esquistosidad o estructura genésica. Diaclasas oblicuas o diagonales son las que se direccionan en la dirección que se encuentra entre el azimut y la dirección de buzamiento de las rocas asociadas. Diaclasas de estratificación son paralelas a la estratificación de las rocas sedimentarias asociadas.

2.2.6.2. Criterios para el diagnóstico de diaclasas.

Debido que las diaclasas son estructuras que, al momento de su interpretación, generan controversias; Hancock (1984) propone, 10 criterios que pueden proporcionar pistas para ayudar a su interpretación:

- **Características microscópicas.** Una sección delgada de una grieta clasificada como una diaclasa en el campo, podría revelar si en una microescala hay evidencia de desplazamiento de cizalla o dilatación.
- **Marcas de superficie.** Se puede usar para ubicar el punto de inicio, dirección y el historial de propagación de una fractura, pero existe un desacuerdo sobre si indica falla durante la extensión o cizalla.
- **Paralelismo como un indicador cinemático cercano.** Nos hace pensar que al estar paralelas a la una falla puede pertenecer a la misma clase, pero no es muy seguro ya que pueden ser de edades diferentes. Las diaclasas paralelas a las vetas extensionales se interpretan más fácilmente como fracturas de extensión.
- **Continuidad y paralelismo como un indicador cinemático.** El paso a un conjunto de grietas en échelon paralelas a las diaclasas, pero contenidas dentro de una matriz oblicua. La matriz se interpreta como siguiendo una dirección híbrida o cortante.
- **Simetría con respecto a los indicadores cinemáticos y afines.** La simetría de un conjunto con respecto a los indicadores cinemáticos relacionados puede sugerir su clase de falla.
- **Simetría con respecto a los pliegues.** Un par de sets compresivos son aproximadamente simultáneas y simétricamente relacionadas con el pliegue que los contiene se interpreta más fácilmente como consistentes en cizalla conjugada o diaclasas híbridas, mientras que las diaclasas normales a una charnela plegada son probablemente fracturas de extensión.
- **Refracción continua en una interfaz entre litologías contrastantes.** Siempre que el σ_2 no sea perpendicular a la estratificación durante la falla, las diaclasas se pueden refractar en planos de estratificación.

- **Diaclasas curvilineales.** Algunas diaclasas dentro de una sola litología muestran una curvatura sistemática que puede explicarse interpretando los diferentes sectores como representando diferentes partes de un continuo de clases de falla desde la extensión hasta la fractura por cizalla.
- **Arquitectura de un sistema de fracturas.** El estilo arquitectónico de un sistema de diaclasas, describe las relaciones espaciales de superficies vecinas y, en plano o perfil se visualiza a partir del patrón de sus trazas, que se puede caracterizar por referencia a las formas de mayúsculas en el alfabeto latino. La arquitectura de las diaclasas de extensión ortogonales es comúnmente en forma de T o de H, donde la diaclasa más joven colinda con la anterior. Las vecinas conjuntas híbridas o de corte generalmente definen formas X, Y o V.
- **Arquitectura del sistema de fractura.** El supuesto rango de 2θ valores entre las diaclasas conjugadas es de 90° o más a unos pocos grados. Se debe anticipar un rango de valores naturales 2θ sabiendo que ϕ varía con la litología y que hay una transición de fracturas de extensión simple a fracturas de cizalla emparejadas.

2.2.7. Fallas.

Las fallas son fracturas de cizalla con movimiento relativo apreciable (Martínez 2003). En su forma más simple una falla es una discontinuidad laminar, o una superficie de ruptura, generada en la roca a través de la cual se produce un desplazamiento o deslizamiento observable (Trigueros 2018). Su característica esencial, es el movimiento diferencial paralelo a la superficie de fractura (Billings 1946). La mayoría de las fallas en un solo plano son el resultado del movimiento de corte en las juntas ya formadas, ya que la liberación de tensión es mucho más fácil por deslizamiento en dichos planos de debilidad que por la falla frágil de la roca intacta (Geoffrey 2006). Las fallas comúnmente se inician en pares conjugados y estas se forman esencialmente al mismo tiempo y bajo el mismo estado de esfuerzo (Groshong 2006).

La mayoría de las fallas, no son simplemente estructuras planas, sino que muestran complejos cambios de forma; estos cambios deben generar necesariamente estructuras de acomodación: pliegues, fallas, desarrollo de clivaje o pérdida de volumen (Bustos 2011). Las fallas no son superficies de deslizamiento perfectamente planas; generalmente tienen ondulaciones suaves y pueden mostrar una curvatura sustancial o curvas pronunciadas (Suppe 2005). Es frecuente que no se observe un plano de falla definido, sino que puede

consistir en una superficie de falla anastomosadas; una falla puede tener de algunos metros a decenas de metros de ancho (Niemeyer 1999).

Se sabe que las fallas deben comportarse de manera quebradiza en profundidades poco profundas y dúctil a profundidades mayores porque los terremotos tectónicos se limitan a profundidades poco profundas. Brace y Kohlstedt en el año de 1980 presentaron un modelo reológico que explica este comportamiento mediante la construcción simple de extrapolar una ley de flujo en estado estable a alta temperatura para intersecar una ley de fricción, identificándose el punto de intersección con la transición frágil-dúctil (Scholz 1989).

2.2.7.1. Elementos de una falla.

Las fallas dibujadas en secciones sísmicas o geológicas generalmente se representan como líneas simples de espesor uniforme; sin embargo, en detalle, las fallas rara vez son superficies simples o zonas de espesor constante. De hecho, la mayoría de las fallas son estructuras complejas que consisten en una serie de elementos estructurales que pueden ser difíciles de predecir (Fossen 2010). Dichos elementos son:

- Bloque techo: zona que está inmediatamente por encima de la superficie de una falla (Tarbuck y Lutgens 2005); queda determinado por el ángulo obtuso formado por la intersección del plano de falla y un plano horizontal imaginario (Rivera 2005).
- Bloque piso: zona que está inmediatamente por debajo de la superficie de una falla (Tarbuck y Lutgens 2005); queda determinado por el ángulo agudo formado por la intersección del plano de falla y un plano horizontal imaginario (Rivera 2005).
- Salbanda de falla: material arcilloso débilmente coherente que resulta de esta actividad de fallamiento y se ubica en la zona de falla (Fossen 2010).
- Espejo de falla: superficie de falla pulida y estriada (Tarbuck y Lutgens 2005).
- Desplazamiento: es la distancia de puntos una vez adyacentes en cualquier lado de una falla (Groshong 2006).
- Salto de falla: es el componente vertical de la separación por buzamiento, medido en una sección transversal vertical en la dirección del buzamiento de la falla (Groshong 2006).
- Empuje de falla: es el componente horizontal de la separación por buzamiento, medido en una sección transversal vertical en la dirección del buzamiento de la falla (Groshong 2006).

- Plano de falla: es el lugar donde se ha producido la rotura y ha tenido lugar el desplazamiento de una de las partes (Rivera 2005).
- Línea de falla: Es la intersección entre la superficie terrestre y el plano de falla (Rivera 2005).

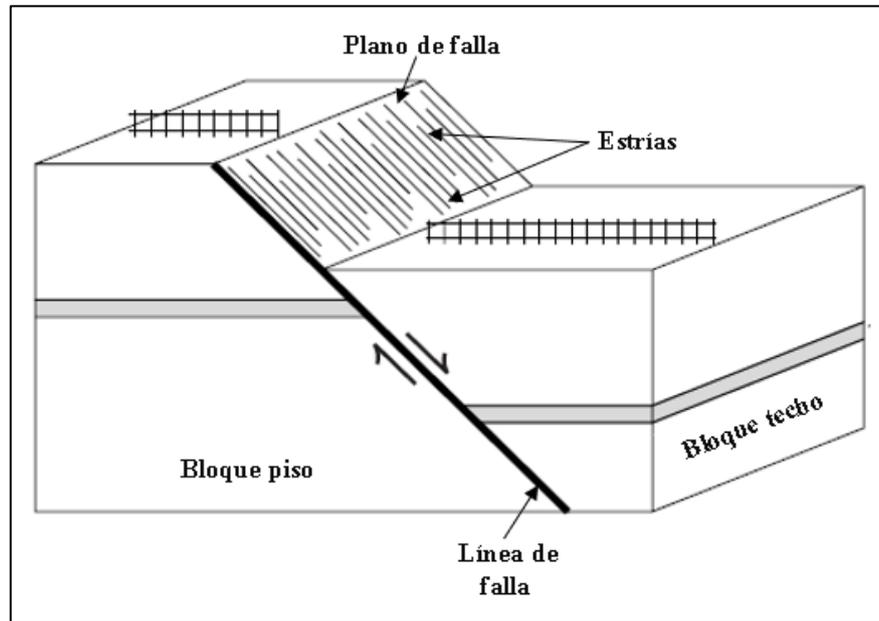


Figura 5. Elementos principales de una Falla (Normal).

Fuente: Adaptado de De Vicente, Muñoz y Giner 1992.

2.2.7.2. Movimiento de las fallas.

Básicamente son dos los movimientos en las fallas y estos son los movimientos de traslación y de rotación. En el movimiento de traslación no ha habido rotación en los bloques en relación uno con el otro; todas las líneas en los opuestos de la falla y fuera de la zona dislocada que eran paralelas antes del movimiento, son paralelas después. Los movimientos de rotación son aquellos en los que algunas líneas rectas sobre lados opuestos de la falla y fuera de la zona dislocada, que eran paralelos antes del desplazamiento, ya no lo son después de producirse la falla (Billings 1946).

La dirección de la falla es determinada por las estrías de falla, slickensides, fibras de cristales recrystalizados en el plano de falla y lineaciones; mientras que el sentido de movimiento es determinado por las relaciones estratigráficas, desde compensaciones aparentes de unidades guía, diques y otras fallas (McClay 1991).

2.2.7.3. Indicadores cinemáticos

Son evidencias físicas de campo que nos permiten conocer la cinemática de una falla (Ayala 2016). Aquí describiremos algunos de los indicadores cinemáticos más comunes:

- **Riedels.** Este modelo explica, la deformación dentro de una zona sometida a las fuerzas correspondientes a una falla de rumbo (Griem 2015). Los Riedels son redes de bandas de cizalla, comúnmente desarrolladas en zonas de cizalla durante las primeras etapas del fallamiento; estos Riedel se presentan en forma conjugada y en echelón (Katz, Weinberger y Aydin, 2004). La falla no corresponde a un plano uniforme que corta a la roca, sino que en realidad está compuesta por una serie de fracturas; dichas fracturas son conocidas como Riedel, que tienen relaciones geométricas bien definidas según ángulos oblicuos respecto a la traza de la falla principal (Ayala 2016).

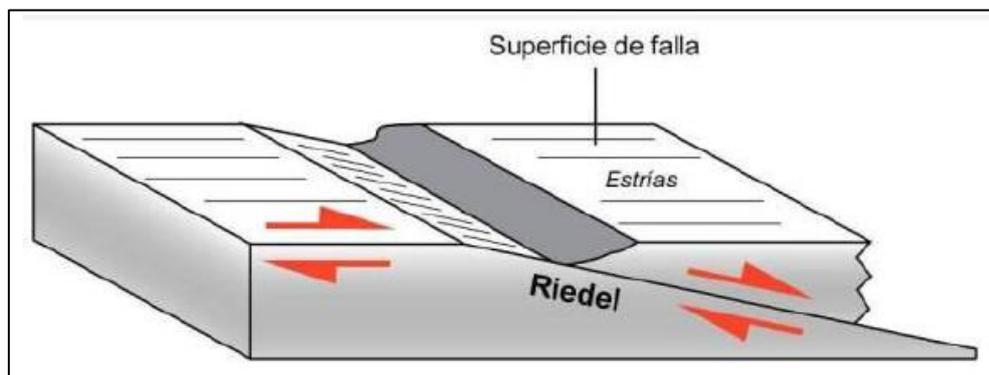


Figura 6. Sentido del movimiento determinado por la relación geométrica oblicua entre el plano de falla y de Riedel.

Fuente: Tomado de Ayala 2018.

- **Fibras de Recristalización.** Las fallas tienden a formar fibras minerales que son precipitadas durante el desplazamiento; la dirección de estos escalones indica la dirección del desplazamiento (Tolson 2008). Estas fibras de mineral son de origen tectónico y pueden ser de cualquier tipo (Ayala 2016).

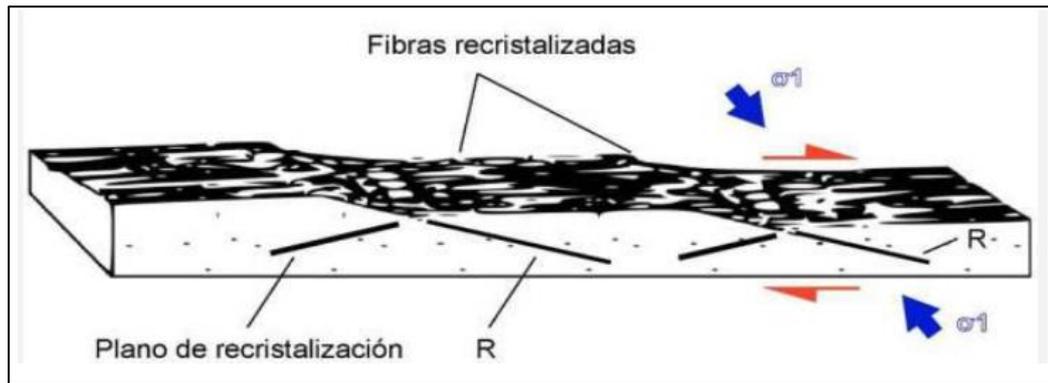


Figura 7. Gráfico esquemático de fibras y planos de recristalización.

Fuente: Tomado de Ayala 2016.

- **Fracturas tipo T.** Son fracturas de tensión no estriadas que se sumergen en varios ángulos a la pared de la falla en la dirección del bloque faltante; estas fracturas son de cualquier origen mecánico y posiblemente más antiguos que la cizalla (Petit 1987). Las fracturas T son grietas de tensión con forma de uña buzando hacia el movimiento (Doblas 1987).

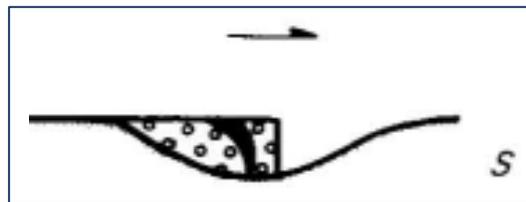


Figura 8. Fractura de tensión tipo T.

Fuente: Tomado de Doblas 1987.

- **Pliegues de arrastre.** Estas estructuras nos ayudan a examinar la cinemática de las fallas dado que, a consecuencia del deslizamiento de una falla, se pueden generar pliegues de arrastre, dentro de un plano marcador por ejemplo un estrato. El pliegue de arrastre indica el sentido correcto del rechazo de la falla sólo en el caso en que el rechazo sea perpendicular al plano marcador, por lo cual este criterio de desplazamiento debe usarse con cuidado (Niemeyer 1999).

2.2.8. Clasificación de las fallas.

La clasificación a realizar está basada en su desplazamiento, ya que esta nos da una idea de la cinemática de las fallas y es relativamente sencilla. Según este criterio, en esta

clasificación se distingue a fallas traslacionales, rotacionales, extensionales y compresionales.

Los términos cinemáticos, normal, inversa y de rumbo son los más apropiados para usar donde las fallas están orientadas simétricamente sobre la horizontal, pero donde las fallas de deslizamiento están inclinadas simétricamente sobre las capas sedimentarias, puede ser preferible clasificarlas como fallas de contracción o extensión (Hancock 1985).

2.2.8.1. Fallas Traslacionales.

Las fallas traslacionales se clasifican, de acuerdo a su rechazo, en cuatro tipos principales: fallas normales, fallas inversas y fallas de rumbo (Niemeyer 1999).

- **Falla Normal.** Es la cual el bloque techo parece haberse deslizado hacia abajo, en relación con el bloque piso (Rivera 2005). La mayoría de Fallas Normales tienen buzamiento de unos 60° , que tienden a disminuir con la profundidad (Tarbuck y Lutgens 2005). las Fallas Normales "se comunican" con las fallas vecinas, de modo que las contribuciones de deslizamiento y desplazamiento por cada falla resultan en una extensión uniforme general (Davis et al. 2012). Un tipo especial de las Fallas Normales son las Fallas Escalonadas, las cuales no se explican por una extensión regional, sino por una cupla (Billings 1946).
- **Falla Inversa.** En esta falla el bloque techo se alza respecto al bloque piso (Niemeyer 1999). Las fallas de deslizamiento y deslizamiento inverso deben contraer (acortar) una capa de roca horizontalmente y engrosarla verticalmente (Davis et al. 2012). Según su inclinación se diferencian varios tipos: para ángulos menores a 45° se denominan Fallas Inversas; para ángulos comprendidos entre 15° y 45° , se denominan Cabalgamientos; y para valores de 0° a 15° , Mantos de Corrimientos (Rivera 2005).
- **Falla de Rumbo.** Se dividen en Fallas de Rumbo Dextral, cuando el bloque de la derecha se desplaza en dirección del observador; y en Fallas de Rumbo Sinistral, cuando el bloque de la izquierda se desplaza en dirección del observador (Rivera 2005).

Niemeyer (1999) afirma que, la denominación de fallas con rechazo oblicuo es compuesta y depende del valor del rake. Si el rake es menor que 45° , predominará la componente transcurrente y la falla será:

- Dextral-Normal o Dextral-Inversa.
- Sinistral-Normal o Sinistral-Inversa.

Y si el rake de la estría es mayor que 45° predominará el componente de manto y la falla pasa a denominarse:

- Normal-Dextral o Normal-Sinistral.
- Inversa-Dextral o Inversa-Sinistral.

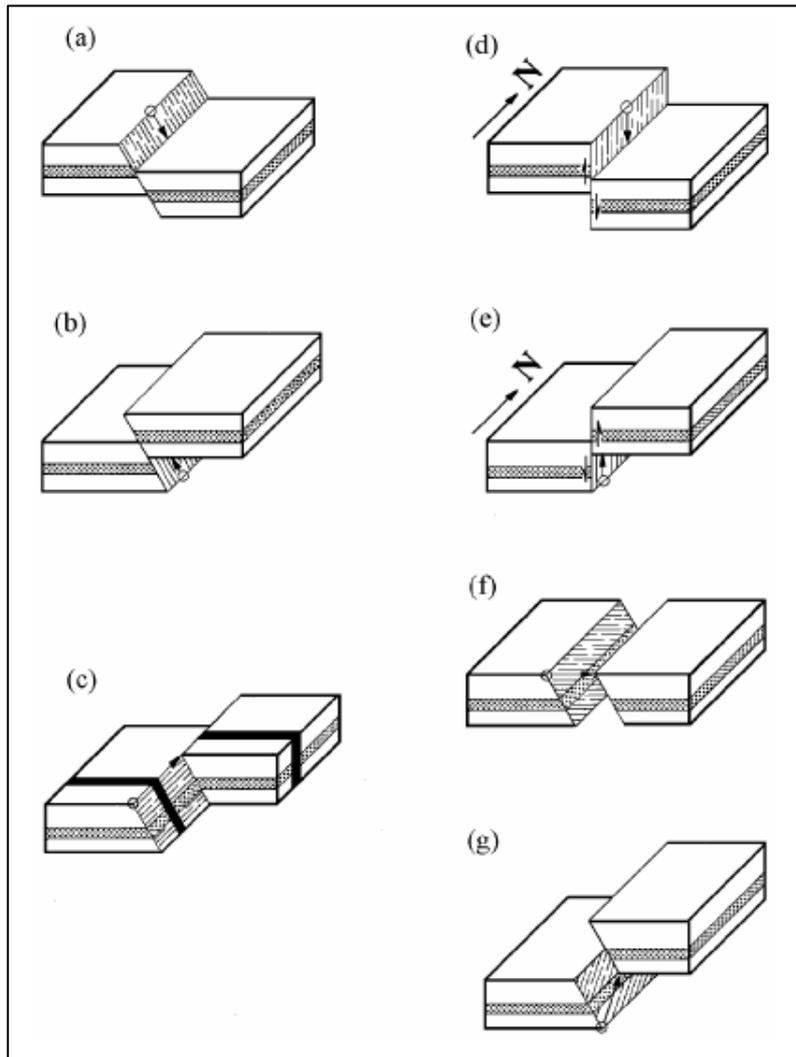


Figura 9. (a) Falla Normal. (b) Falla Inversa. (c) Falla de Rumbo. (d) Falla Vertical, baja el bloque oriental. (e) Falla Vertical, baja el bloque occidental. (f) Falla Sinistral Normal. (g) Falla Sinistral Inversa.

Fuente: Tomado de Niemeyer 1999.

2.2.8.2. Fallas Rotacionales.

Ocurre una rotación de los bloques involucrados en la falla, se distinguen las fallas con rotación a favor de los puntos de reloj y las fallas con rotación en contra (Niemeyer 1999).

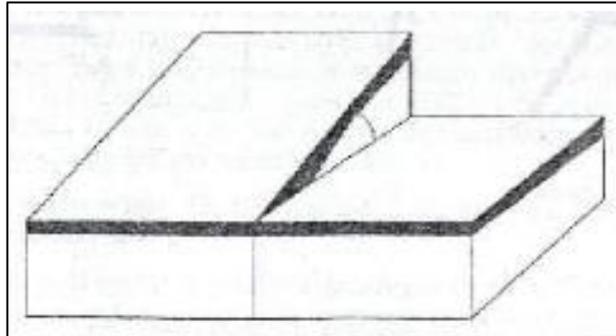


Figura 10. Falla rotacional

Fuente: Tomado de Rivera 2005.

2.2.9. Diedros Rectos.

Cuando una falla se mueve, el propio plano de falla y el plano perpendicular a la orientación del movimiento relativo entre los dos labios de la falla, representada por la estría de fricción, dividen el espacio en cuatro cuadrantes; según sea el movimiento, estos Diedros Rectos quedarán en modo alterno en compresión y extensión (De Vicente et al.). El método de diedros rectos guarda cierta similitud con el procedimiento de cálculo de mecanismos focales de terremotos. Trazando un plano auxiliar perpendicular a la estría de deslizamiento la región en torno a una falla queda dividida en cuatro diedros rectos. El esfuerzo principal mayor σ_1 queda contenido en los diedros de compresión, y el menor σ_3 en los de extensión. La superposición de los diedros de extensión y de compresión de todas las fallas de una población nos definirá la orientación más probable de σ_3 y σ_1 respectivamente (Casas, Gil y Simón 1990).

2.2.10. Zonas de cizallamiento.

Las zonas de cizallamiento tienen en cuenta el desplazamiento pero este, se distribuye a través del grosor de una zona tabular que tiene centímetros, metros o incluso kilómetros de grosor; pero a diferencia de las superficies de falla ordinarias, las zonas de cizallamiento generalmente no muestran ninguna ruptura física discreta; en cambio, el desplazamiento se

logra sin pérdida de cohesión y continuidad, aunque las rocas "atrapadas" en zonas de cizalla pueden sufrir cambios extremos en su forma y orientación (Davis et al. 2012).

Las zonas de cizallamiento son zonas estrechas, zonas subparalelas de fuerte deformación no coaxial; estas ocurren en todos los rangos de escalas, desde deformación frágil, hasta deformación dúctil (McClay 1991). Las zonas de cizallamiento en rocas sedimentarias característicamente contienen vetas en echelon enfrentadas contra la sensación de cizallamiento o un clivaje y una fábrica con forma de grano que se enfrenta con él, o ambas (Hancock 1985). Estas fracturas se encuentran típicamente rellenas de cuarzo o calcita y forman a 45° de la dirección de a cizalla (Tolson s.f.).

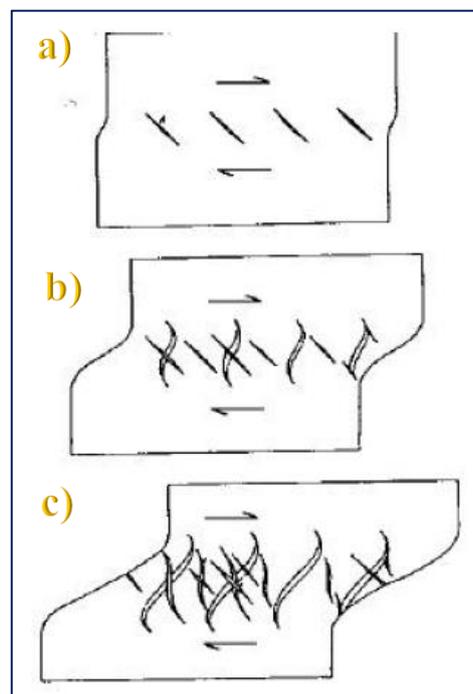


Figura 11. Deformación progresiva en una zona de cizalla. a) Venillas rellenas de mineral. B) Venillas plegadas y rotadas. C) Nuevo sistema de venillas.

Fuente: Tomado de Tolson s.f.

2.2.11. Pliegues.

Es una flexión u ondulación de la roca de la corteza (Rivera 2005). Existen pliegues cuyas amplitudes se miden varios kilómetros, otros en cientos o decenas de metros; pero existen pliegues diminutos, que se les denomina fruncimiento de rocas (Belousov 1979). La mayoría de los pliegues están íntimamente asociados con fallas y zonas de corte, y la geometría del plegado tiene una estrecha dependencia con la forma de la falla debajo (Davis et al. 2012).

2.2.11.1. Elementos de un pliegue.

- **Charnela.** Es la línea de máxima curvatura en la superficie plegada (McClay 1991).
- **Superficie axial.** La superficie axial de un pliegue se define como la superficie que contiene las líneas de charnela de todos los horizontes en el pliegue (Groshong 2006).
- **Plano axial.** La superficie axial de un pliegue puede ser plana, en cuyo caso se denomina plano axial (Davis et al. 2012).
- **Inmersión.** si la charnela está inclinada, esta forma un ángulo con la horizontal, denominado inmersión (Tarbuck y Lutgens 2005).
- **Flancos.** Se les denomina así a los dos lados del pliegue (Tarbuck y Lutgens 2005).
- **Punto de charnela.** Es el punto máximo de curvatura de una capa plegada y está localizada en el centro de la zona de charnela (Fossen 2010).
- **Punto de inflexión.** Es donde se une los segmentos curvos de las extremidades de convexidad opuesta se unen en lugares conocidos como puntos de inflexión (Davis, Reynolds y Kluth 2012).
- **Eje de plegado.** Es la aproximación más cercana a una línea recta que, cuando se mueve paralela a sí misma, genera la forma del pliegue (Davis et al. 2012).
- **Vergencia.** Es el término usado para indicar la dirección del movimiento y rotación que ha ocurrido durante la deformación (McClay 1991).

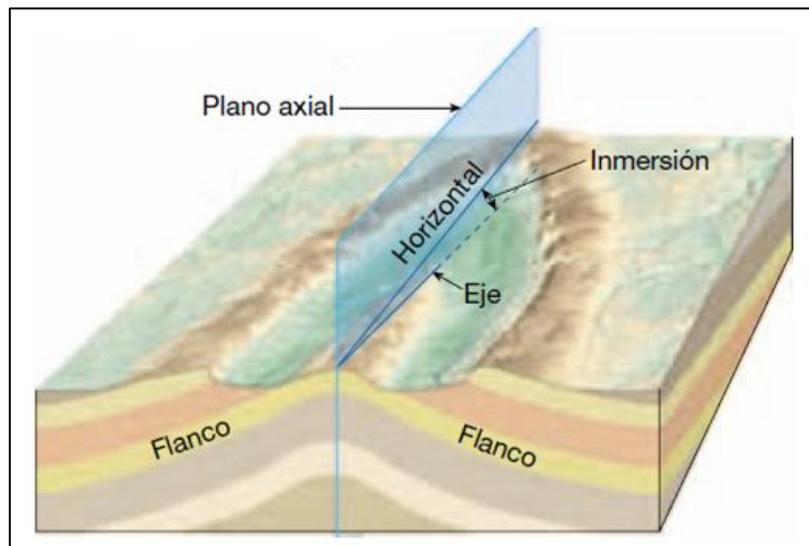


Figura 12. Esquema idealizado de las partes de un pliegue simétrico.

Fuente: Tomado de Tarbuck y Lutgens 2005.

2.2.12. Clasificación de pliegues.

Existen diversas clasificaciones de pliegues, atendiendo a diferentes criterios; pero finalidades del estudio solo los clasificará de acuerdo a la clasificación hecha por Rivera (2005), atendiendo a los criterios de acuerdo a su forma y de acuerdo a la inclinación del plano axial.

2.2.12.1. Atendiendo a la inclinación del plano axial.

- **Simétrico.** Sus flancos presentan buzamientos semejantes y el plano axial es vertical y divide el ángulo interflanco formado por la extensión de los dos flancos en partes iguales.
- **Asimétrico.** Presentan el plano axial inclinado y los buzamientos de flancos son diferentes; el plano axial no divide al ángulo interflanco.
- **Volcado.** La inclinación del plano axial ha originado que ambos flancos se inclinen en la misma dirección, generalmente con ángulos diferentes, de tal manera que el flanco invertido ha sobrepasado la vertical, produciéndose una superposición anormal.
- **Recumbente.** Llamados también acostados, son aquellos en donde el plano axial ha llegado a colocarse en la horizontal.

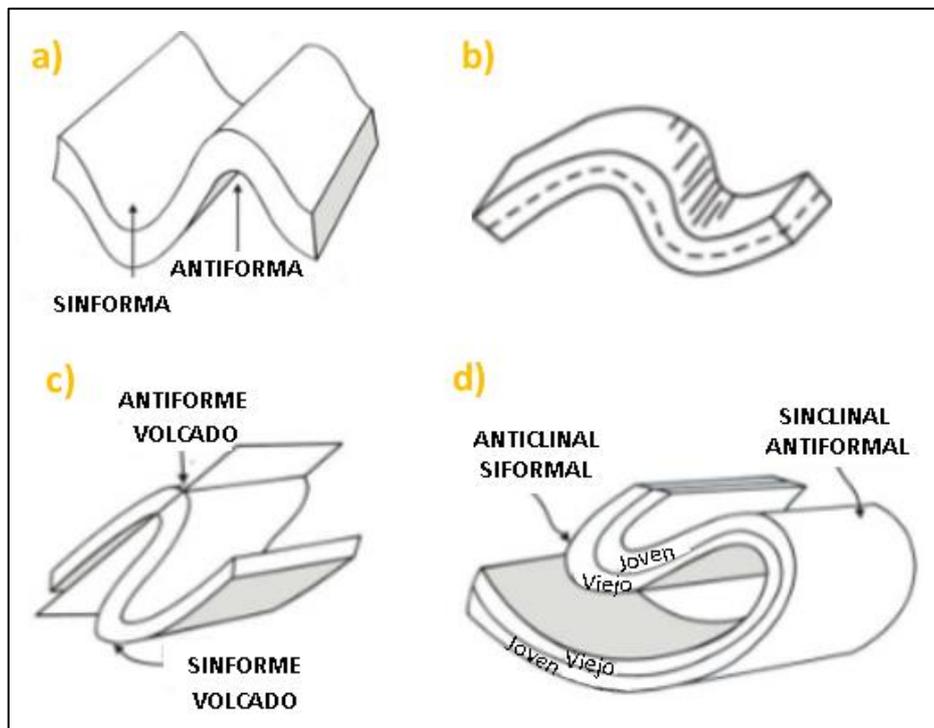


Figura 13. Tipos de pliegues atendiendo a la inclinación del plano axial. a) Simétrico. b) Asimétrico. c) Volcado. d) Recumbente.

Fuente: Elaborado con base en Rivera 2005.

2.2.12.2. Atendiendo a su forma.

- **Anticlinal.** Es un pliegue convexo hacia arriba, en el cual los flancos se inclinan en direcciones opuestas a partir del eje. Las rocas más antiguas se localizan en el núcleo.
- **Sinclinal.** Es un pliegue cóncavo hacia arriba, en el cual los flancos buzan hacia el fondo de la depresión. En un sinclinal las rocas más jóvenes se localizan en su núcleo.
- **Monoclinal.** Con este término se denominan a un conjunto de estratos que se inclinan en una sola dirección y con ángulo uniforme.
- **Isoclinal.** Conjunto de pliegues sucesivos que presentan sus flancos paralelos e igualmente inclinados, con el mismo ángulo y la misma dirección.
- **En cofre.** Pliegue en “caja” con flancos próximos a la vertical y la charnela próxima a la horizontal.
- **En abanico.** Pliegues en donde ambos flancos están volcados.
- **Chevron.** Son los pliegues cuyos planos son aproximadamente planos y las charnelas del pliegue son angulares.

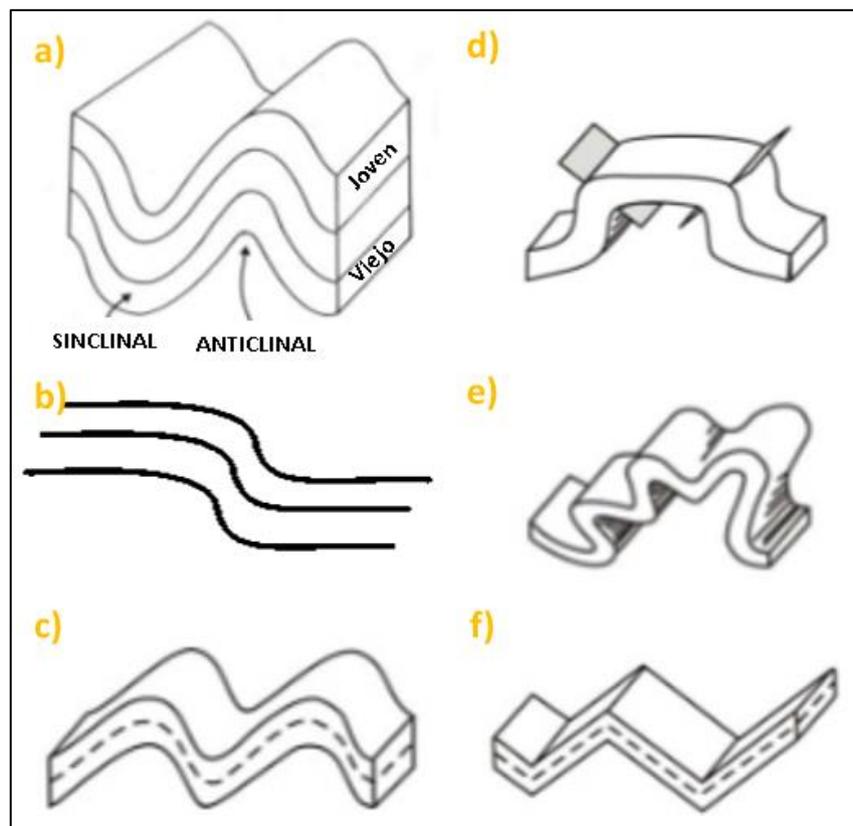


Figura 14. Tipos de pliegues de acuerdo a su forma. a) Anticlinal y sinclinal. b) Pliegue Monoclinal. c) Isoclinal. d) Pliegue en Caja. e) Pliegue en Abanico. f) Pliegue Chevron.

Fuente: Elaborado con base en Rivera 2005.

Adicional a la clasificación mencionada por Rivera, en la presente investigación se también se clasificará de acuerdo al ángulo de inclinación que presentan los pliegues:

2.2.12.3. Atendiendo al ángulo de inclinación del eje del pliegue.

- **Pliegue cilíndrico.** Los pliegues con líneas de charnela rectas son cilíndricos; un pliegue cilíndrico se puede ver como un cilindro parcialmente desenvuelto donde el eje del cilindro define el eje de plegado (Fossen 2010). Un pliegue cilíndrico si tiene la misma forma en el plano del perfil en todos los puntos a lo largo del eje del pliegue (McClay 1987).

La característica geométrica distintiva de los pliegues cilíndricos es que cada parte de la superficie plegada está orientada de manera que contiene una línea cuya orientación es idéntica a la de la línea de charnela (Davis et al.2012). Un pliegue cilíndrico se define por la propiedad de que todos los polos de estratos yacen paralelos al mismo plano, independientemente de la forma transversal específica del pliegue; esta propiedad es la base para encontrar el eje del pliegue, en un estereograma los polos a la estratificación caen en un círculo mayor; el polo de este gran círculo es el eje de plegado, conocido como el eje π cuando se determina de esta manera (Groshong 2006).

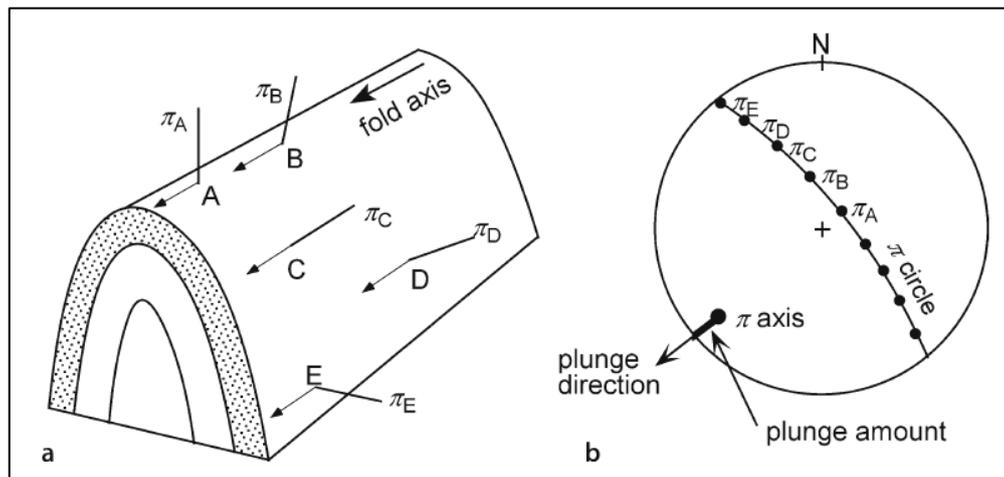


Figura 15. a) Geometría de pliegue. A – E son puntos de medición, $\pi_A - \pi_E$ son polos a la estratificación. b) Eje (eje π) determinado a partir de un estereograma.

Fuente: Tomado de Groshong 2006.

- **Pliegue no cilíndrico.** En alguna escala, todos los pliegues no son cilíndricos, ya que tienen que comenzar y terminar en algún lugar, o transferir la deformación a los pliegues vecinos, pero el grado de cilíndricidad varía de un pliegue a otro (Fossen 2010). Los

pliegues no cilíndricos son aquellos que no pueden generarse por una línea recta que se mueve paralela a sí misma en el espacio (Rowland et al. 2007).

- **Pliegue cónico.** Un pliegue cónico se define por el movimiento de una línea generatriz que se fija en el vértice de un cono (Figura 17a); la forma del pliegue es una porción de un cono. Un pliegue cónico termina a lo largo de su trend. En un estereograma, los polos del estrato caen en un círculo menor, cuyo centro es el eje del cono y cuyo radio es 90° menos el ángulo semi-apical (Groshong 2006). Parte de la geometría de un pliegue cónico se define por el trend y el plunge del eje de la línea central, que corre hacia el centro del cono y pasa a través del vértice, que se encuentra en la dirección de la punta del cono (Davis et al. 2012).

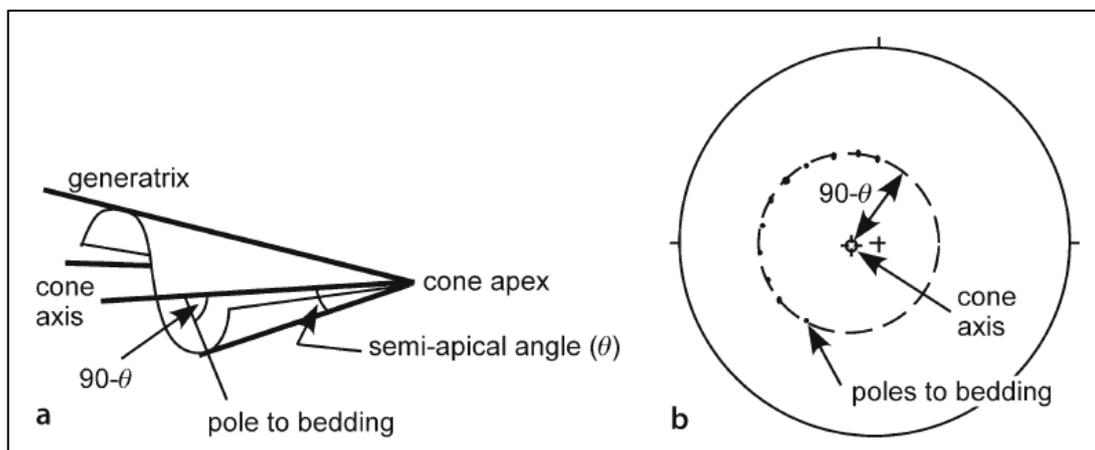


Figura 16. Geometría de pliegue cónico. a) Forma de una capa cónica plegada. b) Proyección de estereograma del hemisferio inferior de un pliegue cónico.

Fuente: Tomado de Groshong 2006.

2.2.13. Clivaje.

El término “clivaje” es difícil de definir: se refiere en términos generales a superficies planas a curviplanas alineadas, muy espaciadas, que tienden a asociarse con pliegues y a orientarse paralelamente a las superficies axiales de pliegues (Davis et al 2012). También se define como una laminación secundaria que se desarrolla en la roca como resultado de la deformación; se forma perpendicular a σ_1 , a menudo se asocia con plegamiento y puede ser localizado o regional (Miller 2018). Los planos de clivaje y las estilolitas tectónicas en un pliegue pueden indicar el origen mecánico del pliegue porque se forman aproximadamente

perpendicular a la dirección máxima de acortamiento mediante procesos que van desde la rotación del grano hasta la solución de presión (Groshong 2006).

El clivaje marca lugares donde la disolución de la presión causada por la influencia del esfuerzo tectónico dirigido resultó en la pérdida de material (otra forma de acomodar el acortamiento); estas hendiduras atraviesan las capas litológicas de los lechos plegados como si los lechos no tuvieran ninguna influencia mecánica y está alineado simétricamente con respecto a la forma de un pliegue dado; es decir, orientado de una manera que sugiere que la clivaje se formó aproximadamente perpendicular a la dirección de acortamiento (Davis et al. 2012). El clivaje en un pliegue de pandeo está típicamente en un ángulo alto con respecto del estrato, siendo más casi perpendicular al estrato en unidades rígidas y más casi paralela a la superficie axial en unidades blandas. El clivaje que es aproximadamente perpendicular a la estratificación produce un abanico de clivaje en todo el pliegue (Groshong 2006). El clivaje y el plegamiento formados durante la misma deformación comparten el mismo eje cilíndrico; clivaje es generalmente perpendicular a la estratificación a lo largo de la línea de charnela de un pliegue; además, la intersección del clivaje y la estratificación es paralela a la línea de charnela y al eje de plegado (Suppe 2005).

2.2.13.1. Relación del clivaje con estructuras principales.

Cuando el plegamiento y la rotura se forman en el mismo campo de esfuerzos, los planos de clivaje y los planos axiales serán aproximadamente paralelos entre sí (Miller 2018). Una de las principales características del clivaje es que se dispone aproximadamente paralelo al plano axial de los pliegues generados durante la misma fase de deformación; esto es una consecuencia de que ambas estructuras tienden a ser paralelas al plano máximo de del elipsoide de deformación finita (Martínez 2013).

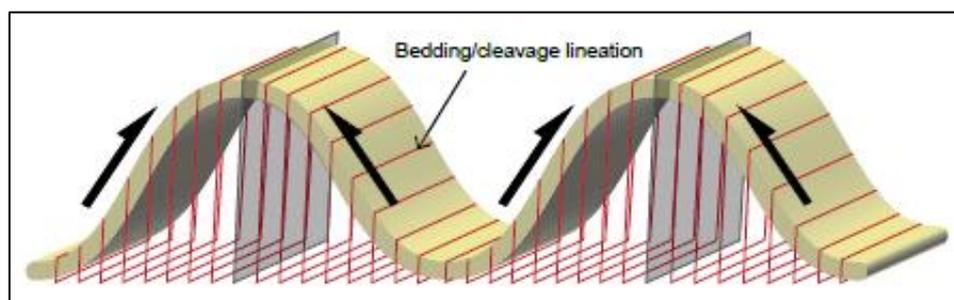


Figura 17. La relación entre el clivaje y el plegamiento. Las flechas negras dan sentido de vergencia.

Fuente: Tomado de Miller 2018.

Las zonas de falla y las zonas de corte pueden contener rocas clivadas, incluso cuando no hay pliegues; así a veces vemos superficies de clivaje delicadas y penetrantes en zonas de gubias a lo largo de fallas. Cuando se encuentra el clivaje en este tipo de entorno estructural, su orientación generalmente se alinea en un ángulo agudo pequeño a la zona de falla misma, las zonas de cizallamiento dúctil frágil pueden mostrar la misma relación (Davis et al. 2012).

2.2.14. Lineamientos.

Es la alineación subparalela a paralela de elementos de fábricas lineales alargados en un cuerpo de roca, comúnmente penetrante en el afloramiento y/o escalas de observación de muestras manuales y también comúnmente en la escala microscópica (Davis et al. 2012).

2.2.15. Principios Geológicos.

2.2.15.1. Principio de horizontalidad original.

Steno propuso el principio de horizontalidad original, el cual establece que las capas se depositan inicialmente en una posición horizontal, aunque ellas se pueden encontrar más tarde buzando abruptamente, los cuales deben haberse dislocado de alguna manera (Blandón 2002).

2.2.15.2. Principio de relación de corte.

Este principio establece que las intrusiones ígneas, las fallas y los pliegues son más jóvenes que las rocas que las afectan (Blandón 2002). El estudio de las relaciones de corte entre diversas estructuras, permiten determinar el orden en que se han generado y por consiguiente ordenar los procesos tectónicos que han ocurrido en una región.

2.3. DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS.

- **Estructura Geológica.** Es una característica geométrica de la roca cuyo aspecto, forma y distribución se puede describir (Van Der Pluijm y Marshak 2004).
- **Fractura.** Discontinuidades aproximadamente planas que separan bloques con movimiento paralelo al plano de discontinuidad (Trigueros 2018).

- **Fracturamiento.** Deformación mecánica que envuelve ruptura progresiva de enlaces atómicos, sin que el material pierda coherencia (Van Der Pluijm y Marshak 2004).
- **Fractura extensional.** Son fracturas que se forman cuando los bloques adyacentes se alejan unos de otros en una dirección subperpendicular al plano de fractura; dicha dirección es paralela al menor esfuerzo (Rey s.f.).
- **Geología estructural.** La Geología Estructural trata la forma, distribución y estructura interna de las rocas; haciendo especial énfasis en los procesos que intervienen en su deformación tanto a pequeña como a mediana escala (Martínez 2003).
- **Rake.** Es el ángulo que forma una línea en un plano, con una línea horizontal en el mismo plano (Billings 1946).
- **Vergencia.** Es el término que se aplica para pliegues asimétricos y es utilizado para indicar la dirección del movimiento y rotación que ocurre durante la deformación (McClay 1987).

CAPÍTULO III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. UBICACIÓN Y ACCESIBILIDAD.

3.1.1. Ubicación Política.

El área de estudio se ubica políticamente en una zona donde colindan tres distritos; específicamente está ubicada al noreste de Namora, suroeste de Oxamarca y noroeste de Gregorio Pita. Estos distritos pertenecen a tres provincias del departamento de Cajamarca; las cuales son Cajamarca, Celendín y San Marcos; siendo Namora perteneciente a Cajamarca, Oxamarca, perteneciente a Celendín y Gregorio Pita a San Marcos.

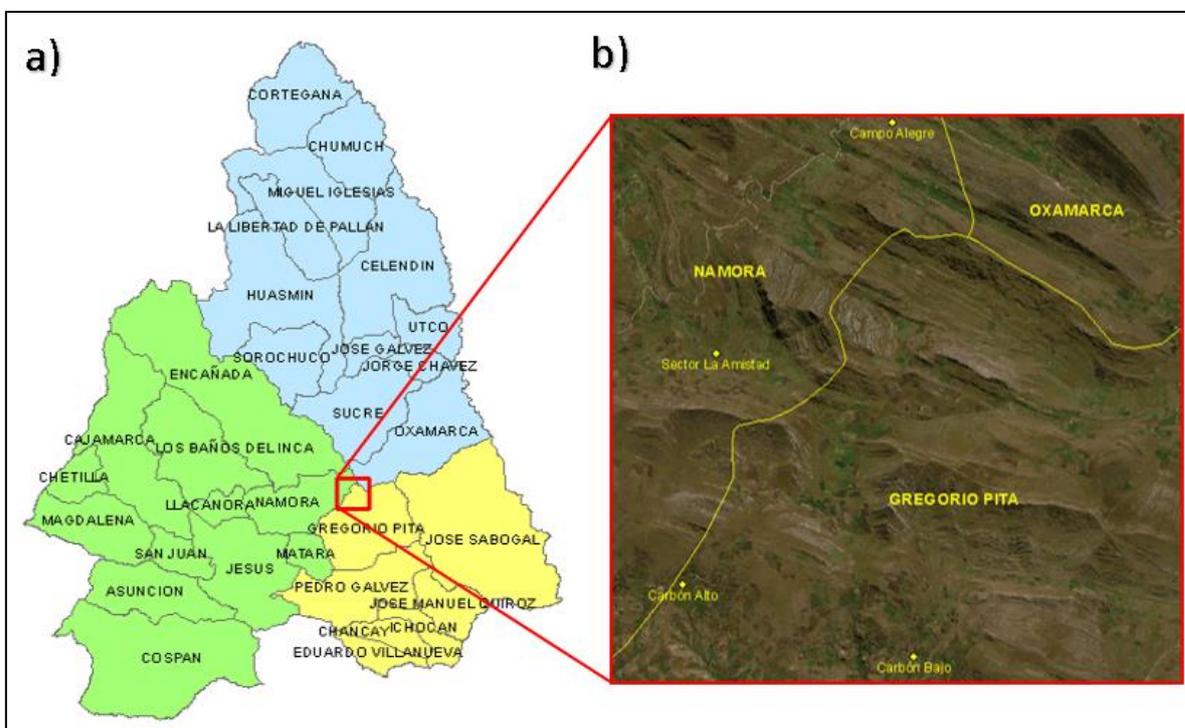


Figura 18. Ubicación política. a) Provincias: Cajamarca, Celendín y San Marcos, con sus respectivos distritos. b) Área de investigación.

3.1.2. Ubicación Geográfica.

El área de estudio se encuentra localizada en la cordillera occidental de los Andes, en la parte noreste del valle de Cajamarca. Según la proyección UTM, está ubicada en la zona 17 sur (17S), sus coordenadas fueron tomadas en el sistema WGS-84; y se presentan a continuación en la siguiente tabla:

Tabla 1. Coordenadas de los vértices del área de estudio. El sistema WGS-84, UTM, zona 17S.

VÉRTICES	COORDENADAS	
	Este	Norte
NE	814000	9210000
NO	814000	9204000
SO	808000	9204000
SE	808000	9210000



Foto 1. Cerro Patillo, ubicado en el caserío La Amistad.

3.1.3. Accesibilidad.

Para acceder al área de investigación, debemos dirigirnos a Huanico; esto se logra a través de tres rutas principales, la primera de ellas es yendo por Polloc; y la segunda es por Namora, esta ruta se divide en dos, ya que a Namora se puede llegar por Iscoconga o por Baños del Inca (ver tabla 2). En cuanto estado de las vías, en la primera ruta está completamente asfaltada hasta Polloc y luego es carretera afirmada; la segunda y tercera ruta es asfaltada hasta Namora y el resto del trayecto también carretera afirmada.

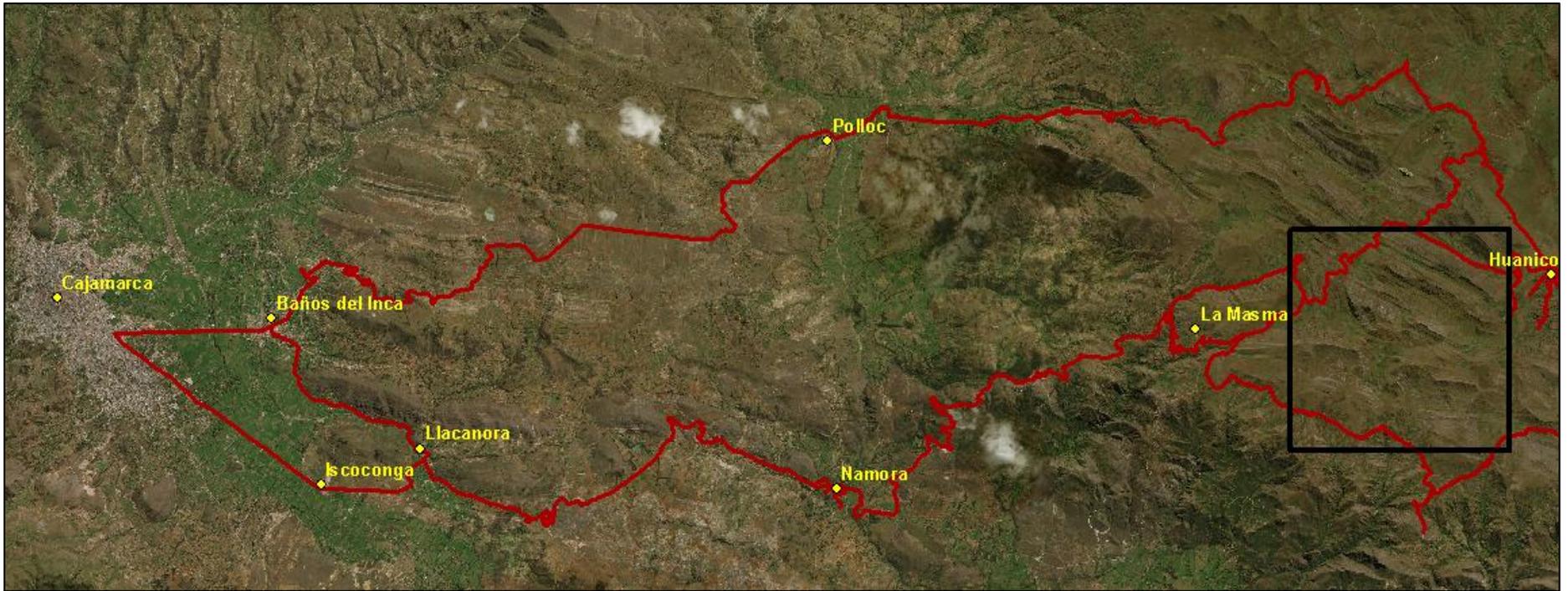


Figura 19. Imagen satelital donde se muestra las dos rutas principales a Huanico.

Fuente: Elaborado en base a una imagen satelital extraída del programa SAS Planet, 2020.

Hay un paradero de combis en Cajamarca, que se dirigen a Huanico, y salen todos los días a las 3 de la tarde; con excepción del día viernes que las combis parten a las 5 de la madrugada. En Namora también existen algunas combis que se dirigen a Huanico los días viernes y hay combis cada una hora. Los días viernes todas las combis están retornando a partir de las 3 de la tarde.

Tabla 2. Rutas principales para llegar a Huanico.

Ruta	Recorrido	Tipo de vía	Longitud (km)		Tiempo (min)*	
			Parcial	Total	Parcial	Total
1	Cajamarca - Baños del Inca	Asfaltada	4.30	59.30	7	137
	Baños del Inca - Polloc	Asfaltada	23.50		30	
	Polloc - Área de estudio	Afirmada	31.50		100	
2	Cajamarca - Baños del Inca	Asfaltada	4.30	55.80	7	127
	Baños del Inca - Llacanora	Asfaltada	6.80		12	
	Llacanora - Namora	Asfaltada	17.00		18	
	Namora – La Masma	Afirmada	21.70		60	
	La Masma - Área de estudio	Afirmada	6.00		20	
3	Cajamarca - Iscoconga	Asfaltada	7.00	55.30	10	120
	Iscoconga – Namora	Asfaltada	20.60		30	
	Namora – La Masma	Afirmada	21.70		60	
	La Masma - Área de estudio	Afirmada	6.00		20	

* Nota: El recorrido inicia en la ciudad de Cajamarca, desde el óvalo musical. Los tiempos son referenciales y fueron calculados en base a movilidad propia.

3.1.4. Geomorfología.

Para la clasificación de las unidades geomorfológicas, se basó en la clasificación presentada por Rodríguez (2016), en su tesis de maestría; en la cual propone clasificar a las unidades geomorfológicas como: planicies lomadas, laderas y escarpas. Esta clasificación es en base a la pendiente, las cuales se describen en el siguiente cuadro:

Tabla 3. Descripción de Unidades Geomorfológicas.

UNIDAD GEOMORFOLÓGICA	PENDIENTE
Planicies	0° - 8°
Lomadas	8° - 20°
Laderas	20° - 50°
Escarpas	> 50°

Fuente: Tomado de Rodríguez 2016.

Las unidades geomorfológicas encontradas se presentan el plano N° 04; se describen y conceptualizan a continuación:

3.1.4.1. Planicies.

Planicies son las superficies de pendiente muy suave, terrenos bastante homogéneos o ligeramente ondulados; estos terrenos son fáciles de manejar y sirven para actividades agrícolas y ganaderas (Rodríguez 2016).

El rango de pendientes que define a las planicies es de 0° a 8° y se presenta las partes más bajas, las cuales son relacionadas con depósitos glaciares y depósitos eluviales; esos últimos son productos de la erosión insitu de las rocas Cretácicas.

3.1.4.2. Lomadas.

Son geoformas con tendencia cómica, pequeñas elevaciones, homogéneas y de pendientes suaves. Su rango de pendientes está entre 8° y 20° (Rodríguez 2016). En la zona son utilizadas para pastoreo y sembrío de papa.

Las lomadas se encuentran en todas las Formaciones Calcáreas; adyacentes a las planicies y es la zona de transición entre las planicies y las laderas.

3.1.4.3. Laderas.

Geoformas inclinadas, cuya pendiente oscila entre los 20° y los 50°; estas pueden afectar a cualquier tipo de litología.

3.1.4.4. Escarpas.

Las escarpas son de geoformas son de pendiente mayores a 50° y se presentan en las partes más elevadas y se presentan en su mayoría en la Formación Yumagual y en la Formación Cajamarca; esto es debido a que estas formaciones presentan trocas muy competentes resistentes a la erosión lo que produce estos terrenos de fuerte pendiente.

3.1.5. Geología Local.

En general, su Geología está constituida por Formaciones calcáreas. Las Formaciones más antiguas, perteneciente al Cretácico Inferior, aflorando en Namora y Carbón Alto; las Formaciones más recientes pertenecen al Cretáceo Superior y afloran en el lado noreste de Namora y suroeste de Oxamarca. También aflora una formación silicoclástica denominada la Formación Inca.

3.1.5.1. Formación Inca (Ki-in).

Esta Formación infrayace concordantemente a la Formación Chúlec y suprayace con la misma relación a la Formación Farrat (Reyes 1980). Litológicamente consta de una intercalación de areniscas calcáreas y lutitas ferruginosas dando en superficie un matiz amarillento. En campo esta formación está cubierta por depósitos cuaternarios y aflora en la esquina suroeste del caserío de Carbón Alto.

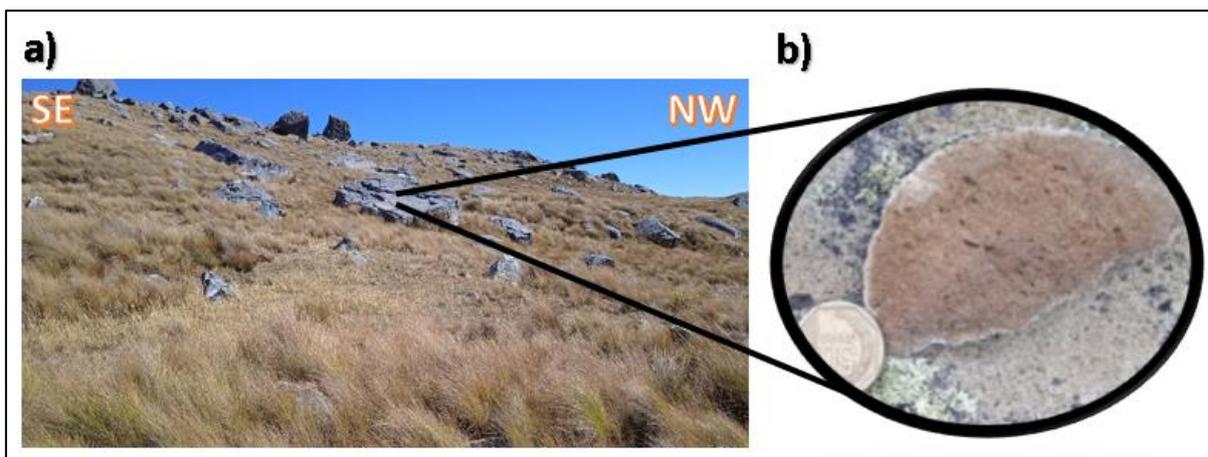


Foto 2. a) Afloramiento de la Formación Inca. b) Muestra de mano de arenisca ferruginosa.

Este: 808121, Norte: 9204142 y Altitud: 3868 m.s.n.m.

3.1.5.2. Formación Chúlec (Ki-chu).

Formación calcárea que aflora al suroeste del caserío de Carbón Alto y en la carretera a la hacienda Collpa; reconociéndose en el corte de dicha carretera. Esta Formación consta de calizas fosilíferas arenosas y arcillitas calcáreas; las calizas poseen un color gris parduzco, las que por intemperismo presenta una coloración amarillenta; así mismo estas calizas tienen un aspecto terroso y presentan nódulos calcáreos.

La Formación Chúlec suprayace concordantemente a la Formación Pariatambo e infrayace a la Formación Yumagual (Reyes 1980).

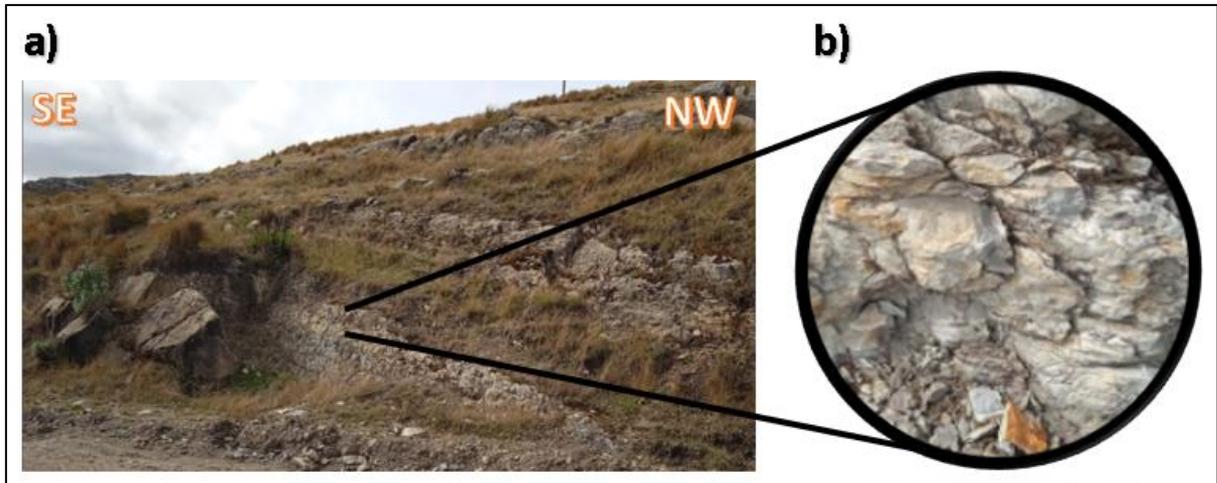


Foto 3. a) Calizas nodulares de la Formación Chúlec. b) Acercamiento a calizas nodulares arenosas.

Este: 808300, Norte: 9208435, Altitud: 3925 m.s.n.m.

3.1.5.3. Formación Pariatambo (Ki-pa).

Litológicamente consiste en una alternancia de arcillitas calcáreas intercaladas con calizas bituminosas, las cuales al fracturarse desprenden un olor fétido (característica para reconocerla en campo). La Formación Pariatambo aflora al oeste del caserío La Amistad, en los núcleos de los anticlinales de las estaciones P-02 y P-04; y se la distinguió gracias al corte de carretera. También se lo ubica en el flanco volcado del sinclinal de la estación P-06, en los caseríos de Carbón Alto y Carbón Bajo; a lo largo del corte de carretera entre estos distritos.

La Formación Pariatambo yace concordantemente sobre la Formación Chúlec e infrayace, con suave concordancia a la Formación Yumagual (Reyes 1980).

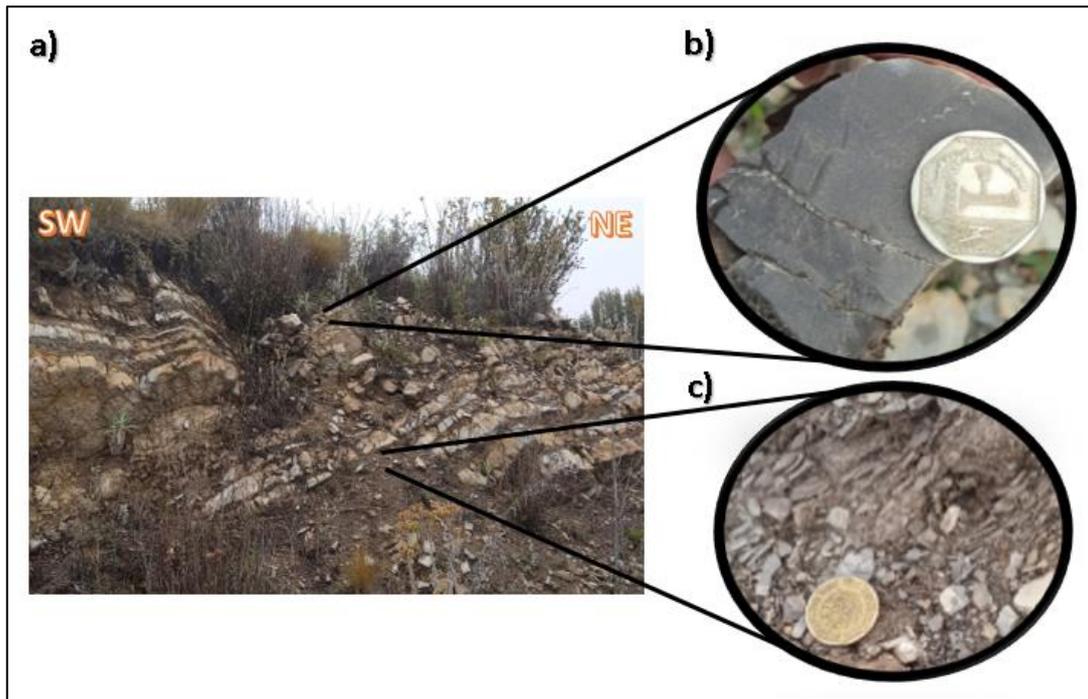


Foto 4. a) Intercalación de Calizas y arcillitas grises de la Formación Pariatambo. b) Caliza bituminosa gris oscura. c) Arcillitas calcáreas.

Este: 808768, Norte: 9208071, Altitud: 3947 m.s.n.m.

3.1.5.4. Formación Yumagual (Ks-yu).

La Formación Yumagual consta de una secuencia de calizas gris parduzcas en bancos o menos uniformes. Aflora en el sector La Amistad y presenta calizas gris parduzcas masivas en escarpas elongadas debido a su dureza uniforme; característica típica de esta Formación. En algunos horizontes se evidencian nodulaciones calcáreas y silíceas (cherts).

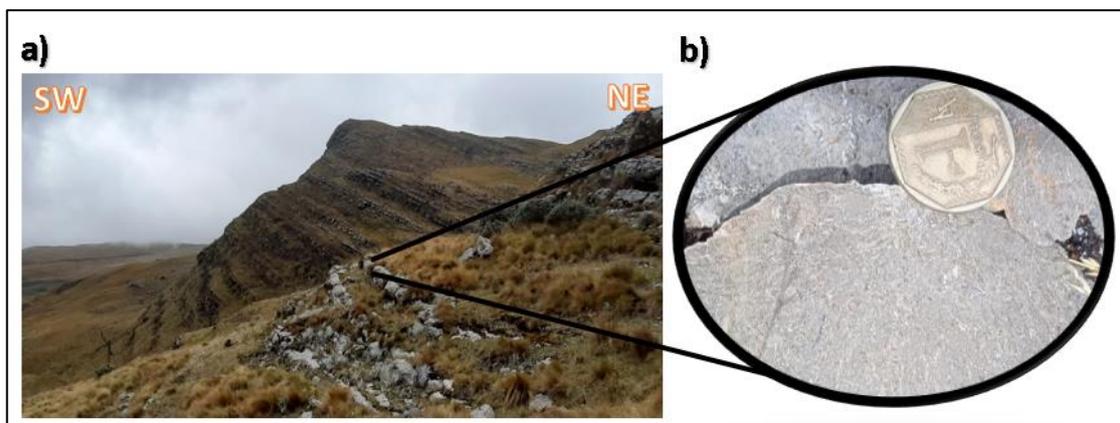


Foto 5. a) Escarpes pronunciados de calizas de la Formación Yumagual. b) Acercamiento de la caliza gris parduzca.

Este: 809977, Norte: 9207465 y Altitud: 9207465 m.s.n.m.

En el flanco NE del anticlinal del sector la Amistad, se reconoció un miembro intermedio bastante fosilífero, con nodulaciones calcáreas; ahí se reconocieron algunos fósiles como *Ostrea scypha*, *liopistha* sp y *Exogyra*.

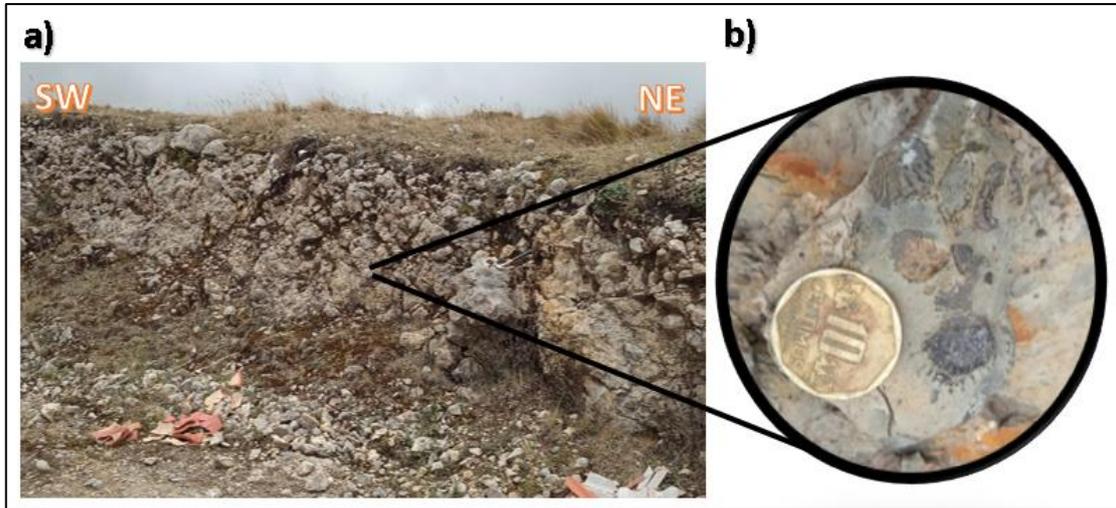


Foto 6. a) Calizas gris parduzcas nodulares del miembro intermedio fosilífero de la Formación Yumagual. b) Derecha acercamiento a roca caliza con *Ostrea scypha*.

Este: 809051, Norte: 9208345, Altitud: 3956 m.s.n.m.

En la parte más alta del caserío La Amistad, así como también en la el cerro La Quinua, se observan algunos Fósiles de Equinodermos en Calizas muy compactas. Los fósiles son difíciles de encontrar en estas rocas muy compactas (Reyes 1980). Las calizas intemperizadas presentan una coloración plomiza a pardo amarillento, mientras que en roca fresca la coloración es gris plomizo a gris oscuro; en algunos estratos se observan nodulaciones calcáreas.

Esta Formación suprayace a la Formación Pariatambo infrayace a la Formación Quilquiñán Mujarrún; ambos con aparente concordancia (Reyes 1980).

3.1.5.5. Formación Quilquiñán – Mujarrún (Ks-qm).

Esta formación aflora al norte de los caseríos La Amistad, Carbón Alto y Carbón Bajo. La base de esta Formación descansa concordantemente con la Formación Yumagual y la parte superior infrayace a la Formación Cajamarca con discordancia paralela (Reyes 1980). La Formación Quilquiñán – Mujarrún consta de una secuencia de calizas nodulares, seguidas de una intercalación de margas y limonitas amarillentas con fósiles del género *exogyra*;

también presentan una secuencia de estratos delgados de calizas nodulares, también fosilíferas las cuales presentan un coloración pardo-amarillenta.

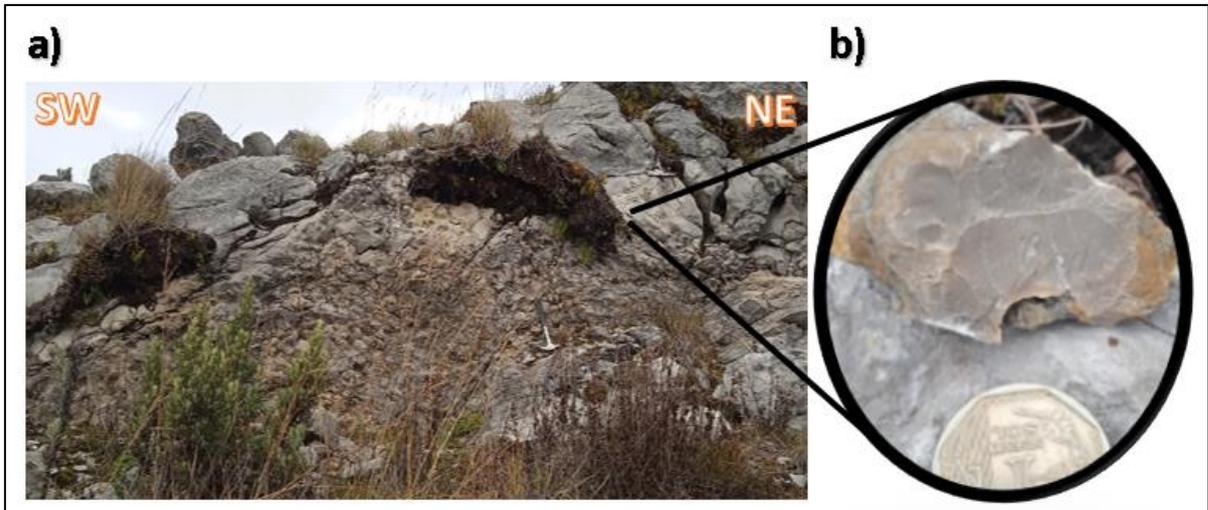


Foto 7. Calizas nodulares de la Formación Quilquiñan Mujarrúm.

Este: 810660, Norte: 9207860 y Altitud: 4002 m.s.n.m.

3.1.5.6. Formación Cajamarca (Ks-ca).

A esta Formación aflora en el caserío de Campo Alegre, a ambos lados de la carretera a Huanico; así mismo también la hallamos al norte del caserío de Carbón Bajo y Carbón Alto. Litológicamente está compuesta por bancos gruesos de calizas grises con intemperismo de color pardo amarillenta. Esta Formación destaca por su homogeneidad litológica y por sus afloramientos kársticos (lenares) de elevadas pendientes.

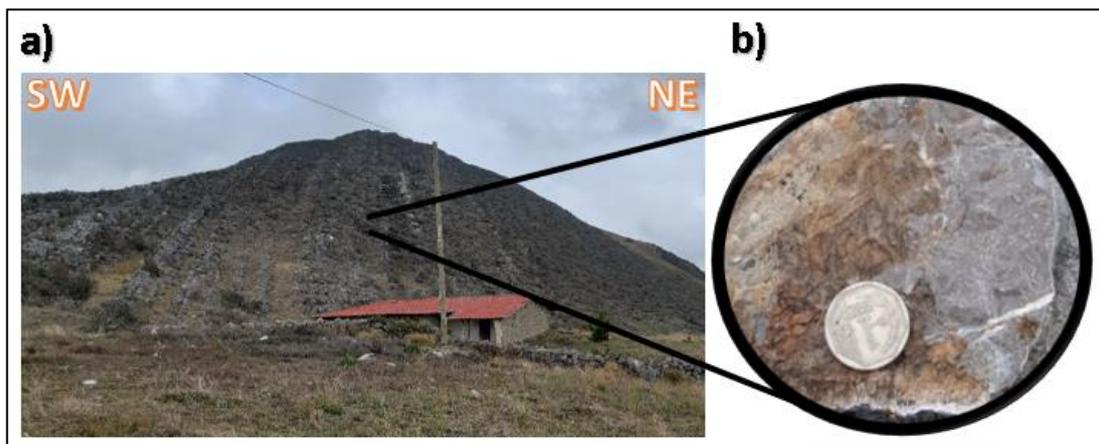


Foto 8.a) Estratos gruesos de calizas macizas de las Formación Cajamarca. b) Caliza gris, con meteorización pardo amarillenta.

Este: 814000, Norte: 9209200 y Altitud: 3725.

La Formación Cajamarca yace concordantemente sobre el Formación Quilquiñan - Mujarrúm y con la misma relación subyace a la Formación Celendín (Reyes 1980).

3.1.5.7. Formación Celendín (Ks-ce).

Litológicamente está constituida por margas y limonitas de color gris; también presenta calizas margosas y algunas son lumaquélicas; así mismo también presenta calizas arenosas color gris claro. Esta formación aflora al NE de Campo Alegre y al SW de Huanico; en el corte de carretera que va a este centro poblado. La Formación Celendín suprayace a la Formación Cajamarca e infrayace a la Formación Chota, pero en la zona de estudio no aflora esta Formación.

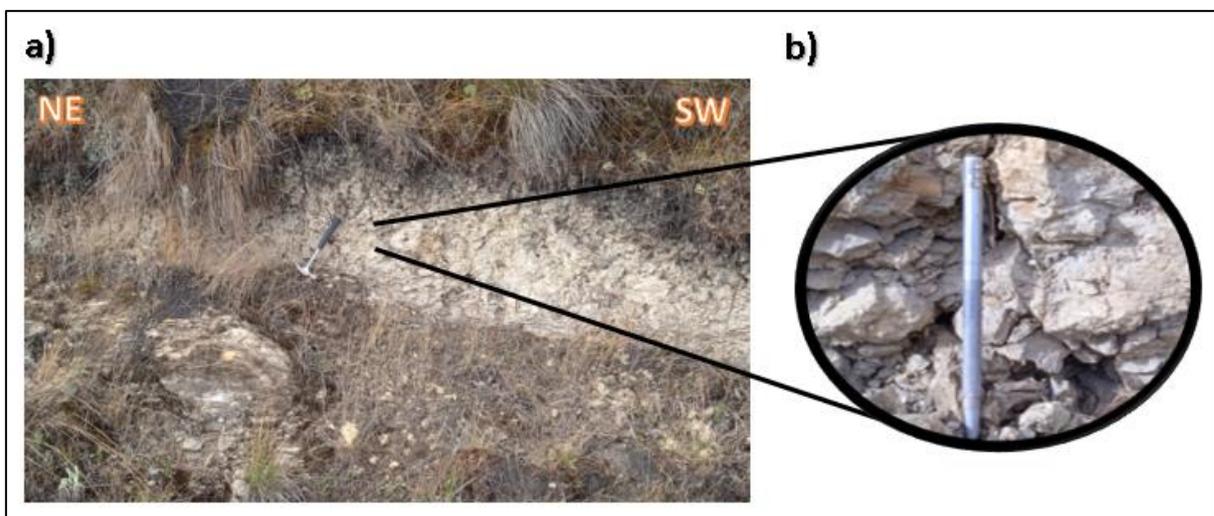


Foto 9. a) Afloramiento de la Formación Celendín. b) Acercamiento a la caliza margosa de color gris claro.

Este: 811968, Norte: 9209687 y Altitud: 3850.

3.2. METODOLOGÍA.

3.2.1. Tipo, nivel, diseño y método de investigación.

El Tipo de Investigación es Descriptiva, pues en una primera instancia se va a describir a las estructuras tectónicas halladas; para ello se tomará su data estructural correspondiente, sus coordenadas y características de litológicas y cinemáticas.

El Nivel es Exploratorio ya que el tema a tratar es poco estudiado y no fue abordado antes en ese lugar.

El Diseño es No Experimental, porque el estudio se realiza sin manipulación de las variables; ya que se basa en la observación directa de las estructuras tectónicas en la actualidad y poder analizar en base a ello. De las divisiones que posee este diseño se tomó la Transversal Descriptiva; esto debido a que se va realizar investigación en un tiempo único y la finalidad es describir las características cinemáticas de las fallas, pliegues y diaclasas para analizar el camino que tomó la deformación.

El Método de Investigación que se realizó es Lógico-Inductivo; ya que se llegó a conclusiones generales a partir de premisas particulares; es decir que a partir de las estructuras identificadas en campo se va a inducir la cinemática general que tuvo la deformación en los eventos tectónicos pasados.

3.2.2. Población de estudio.

Análisis cinemático estructural al noreste de Namora, Cajamarca – suroeste de Oxamarca, Celendín; en un área de 36 km².

3.2.3. Muestra.

Pliegues (asimétricos y volcados), fallas (normal, inversa, inversa-sinistral y sinistral), diaclasas tectónicas y fracturas extensionales.

3.2.4. Unidad de análisis.

Dirección del movimiento de rotación y traslación, ejes principales de deformación, esfuerzos compresivos y extensionales, rumbo y buzamiento de estructuras tectónicas.

3.3. TÉCNICAS E INSTRUMENTACIÓN DE RECOLECCIÓN DE DATOS.

3.3.1. Técnicas.

Análisis de imágenes satelitales. Con el programa Google Earth (GE), a través de su interfaz 3D, se examinó visualmente a las estructuras geológicas a meso escala y se delimitó los accesos a la zona de estudio. En el software Envi 5.1 se aplicó de filtros morfología y filtros direccionales, a imágenes Landsat 8, con la finalidad de encontrar lineamientos y estructuras geológicas.

Caracterización de estructuras geológicas. En campo, a partir de sus características geoestructurales, se determinó el tipo de estructura, se tomó la data correspondiente, se las clasificó y plasmó en un mapa topográfico previamente elaborado.

Determinación de la cinemática de la deformación. Esto se realizó de dos maneras; la primera en campo que, de acuerdo a sus características estructurales e indicadores cinemáticos de las estructuras geológicas presentes en el área de estudio, se determinó el sentido del movimiento. La segunda manera se realizó en gabinete, analizando los datos recogidos en campo mediante los softwares Faultking 8, Stereonet 10 y Dips.

Análisis cinemático estructural. Con toda la información extraída del análisis de imágenes satelitales, la recopilada en campo y los resultados de gabinete; se procedió con el análisis e interpretación correspondiente, teniendo en cuenta toda la teoría expuesta en el Capítulo II. Finalmente se redactó el informe de la presente investigación.

3.3.2. Instrumentos de recolección de datos.

Para la presente investigación se utilizó los siguientes instrumentos de recolección de datos:

Plano geológico, topográfico: los planos han sido utilizados de la ayuda para cartografiado local en campo tanto de las formaciones como de las estructuras presentes; así mismo se usó para ubicarse espacialmente.

Brújula Azimutal Brunton: se utilizó para medir el rumbo, buzamiento y dirección del buzamiento de los estratos, fallas, diaclasas y planos axiales de pliegues; así mismo se usó para una mejor y correcta orientación en campo.

GPS navegador Etrex 10: se utilizó para la ubicación espacial, a través de sus coordenadas geográficas de las formaciones y estructuras presentes en el área de estudio; así mismo se usó para una mejor y correcta orientación en campo.

Libreta de campo: en ella se realizó anotaciones como descripción de los macizos rocosos, datum de fallas y pliegues, caracterización de estructuras y tipo de roca.

Cuadro de recolección de datos estructurales: formatos que se emplearon para la toma de data de las fallas, clivaje y pliegues.

Hojas bond, se usó para realizar secciones geológicas y anotar todo aquello que no se contemple en los cuadros de recolección de datos.

Cámara digital de 24 megapíxeles: utilizada para la tomar fotografías de las formaciones y estructuras geológicas.

Ácido clorhídrico al 20%: se usó para verificar la efervescencia del CaCO_3 en rocas carbonatadas.

Colores: se utilizó para señalar las diferentes estructuras y formaciones geológicas en plano topográfico.

Imágenes satelitales: se usaron para la interpretación de estructuras geológicas.

Picota de geólogo: se utilizó para la toma de muestras de los afloramientos rocosos.

Rayador: se empleó para determinar la raya de los minerales.

Protactor: se utilizó para medir distancia a escala.

Lupa de 10x y 20x: se empleó para una mejor visualización de minerales.

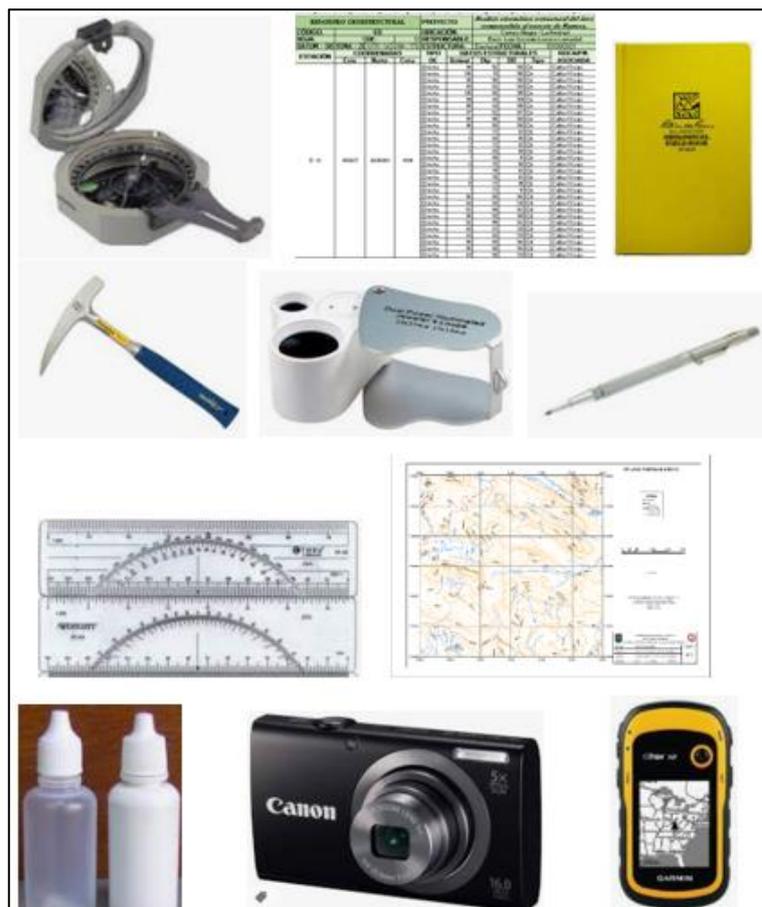


Figura 20. Instrumentos y equipos usados para recolección de datos.

3.3.3. Identificación de variables.

Se han identificado variables independientes y dependientes; así tenemos como variable dependiente a la cinemática y como variable independiente a las estructuras tectónicas.

Tabla 4. Operacionalización de las variables.

VARIABLE	DEFINICIÓN	DIMENSIÓN	INDICADORES
Dependiente			
Cinemática.	Es una rama de la Mecánica que se encarga de la descripción del movimiento responsable de la deformación (Davis et al. 2012).	Descripción del movimiento.	Dirección del movimiento.
			Tipo de movimiento.
			Etapas de movimiento.
		Deformación.	Rotación.
Traslación.			
Distorsión			
Independiente			
Estructuras tectónicas.	Son cuerpos de formas diversas formados por rocas (Belousov 1979). La mayoría de las rocas en profundidad se comportan como sustancia plástica, por ende, se deformarán formando pliegues; mientras que las rocas en o cercanas a la superficie se comportan como material quebradizo, produciendo las fracturas y fallas (Rivera 2005).	Material Plástico.	Pliegues.
		Material Frágil.	Fallas.
			Diaclasas tectónicas.

3.4. PROCEDIMIENTO.

3.4.1. Etapa de planificación.

Esta es la primera etapa y es donde se realizó el cronograma de actividades, se presupuestó todo el dinero a utilizar, se analizó las rutas a recorrer y las movilidades a emplear.

3.4.2. Primera etapa de gabinete.

En esta primera etapa, se revisó la bibliografía pertinente, para profundizar acerca del problema a resolver; también se agenció de la carta geológica regional del cuadrángulo de San Marcos (15-g), para tener una base de la geología y las estructuras, a encontrar en campo. Se elaboró un plano topográfico y un plano con una imagen satelital (descargada del software

SAS Planet, 2020) para realizar un correcto cartografiado, de las estructuras y la geología. También se analizó la accesibilidad de la zona de estudio y se escogió las mejores rutas.

A demás en esta etapa se realizó un análisis visual de la imagen satelital en el programa GE, el cual nos ayuda con su visualización en tres dimensiones, con la que se puede ver mejor las estructuras. También se analizó la Imagen Satelital Landsat 8, para ello se valió de las herramientas de teledetección; aplicando a la imagen: filtros de convolución y morfología y filtros de luz direccional (luz dirigida artificialmente). Con estos filtros se logró a discriminar a las estructuras geológicas; estas imágenes utilizadas fueron previamente corregidas.

3.4.3. Etapa de campo.

Aquí se planificó nueve salidas a campo en las cuales se reconoció a las estructuras tectónicas aflorantes; a las cuales se las caracterizó insitu, se les extrajo toda la data posible, se las plasmó en mapas topográficos (previamente elaborados en la etapa anterior), se elaboró perfiles insitu (para una mejor comprensión de deformación), y lo más importante se determinó la cinemática en campo. Así mismo se reconoció, cartografió y describió a las Formaciones Geológicas (apoyados de la carta 15-g realizada por el INGEMET). Finalmente se tomaron fotografías que nos ayudaron en el análisis posterior y sirvieron también para elaborar el informe.

3.4.4. Segunda etapa de gabinete.

Esta fue la última etapa de esta investigación; en la cual se procedió con el tratamiento de información de las fallas (las que tengan datum completo), pliegues y diaclasas, recopilada en campo; con ayuda de los softwares Faultkin, Steronet y Dips, respectivamente; en donde se analizó los movimientos y la geometría de las estructuras en la Red de Wulf; cada uno de los resultados se los plasmó en el informe. Luego se realizó una interpretación conjunta de la información extraída de las imágenes satelitales, de la información obtenida en campo y los resultados obtenidos en gabinete; para así poder llegar a las conclusiones que respondan a los objetivos planteados en este proyecto. Finalmente se culminó con la elaboración de este informe.

3.5. ANÁLISIS DE IMÁGENES SATELITALES.

3.5.1. Análisis de imágenes Landsat.

Esta primera etapa está referida a la caracterización de lineamientos geológicos, extrayendo información de las imágenes Landsat 8; dichos lineamientos fueron considerados como rasgos lineales rectilíneos o curvilíneos, los que se representan en el contraste de bordes y líneas en las imágenes satelitales; constituidas por alineación de estructuras a nivel local.

3.5.1.1. Datos de entrada.

Para la extracción de datos geoestructurales, se trabajó con una imagen Landsat 8, que es una imagen tomada por satélite Landsat 8 con el sensor OLI y TIRS. Esta imagen tiene 11 bandas (7 bandas en el subsistema VNIR, 2 bandas en el subsistema SWIR y 2 bandas en el subsistema TIR), estas tienen una resolución espacial de 30 metros, a excepción de las bandas térmicas que poseen una resolución espacial de 100 m, y la pancromática que posee una resolución espacial de 15 metros. La fecha de adquisición de la imagen fue el 04 de agosto de 2020, ubicada en el Sistema de Referencia Mundial (WRS) con Path 009 y en el WRS con Row 068. Esta imagen fue descargada por medio de la interfaz de Earth Explorer (earthexplorer.usgs.gov), desarrollada por el Servicio Geológico de los Estados Unidos de Norte América.

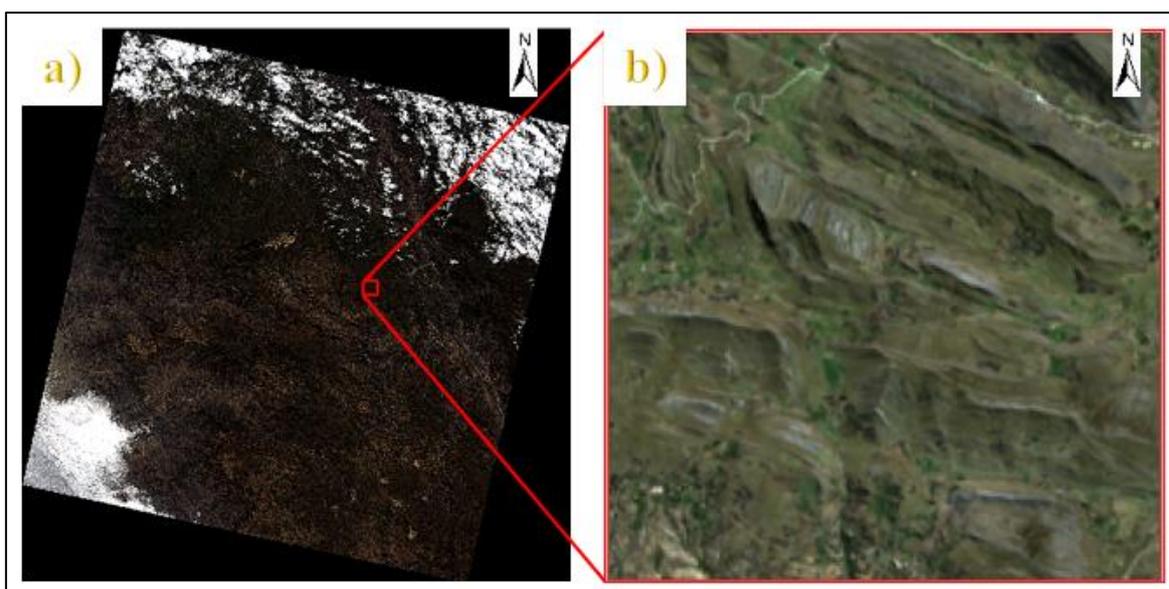


Figura 21. a) Imagen Landsat 8, Path 009 y Row 068. b) Área de tesis.

El software utilizado para este preprocesamiento y procesamiento de estas imágenes fue el software Envi 5.1, ejecutado en una plataforma PC. Con dicho programa, primero se realizó un preprocesamiento que consiste en la corrección radiométrica y atmosférica; para ello se calculó su radiancia espectral y a partir de ella se calculó su reflectancia. Luego se realizó un procesamiento en donde se aplicó filtros de convolución y morfología; y por último se aplicó filtros direccionales con luz dirigida. Finalmente se realizó un post procesamiento con el software ArcGis 10.5, en donde se extrajo manualmente toda la información de la imagen procesada y se elaboró un mapa de lineamientos estructurales.

3.5.1.2. Preprocesamiento.

A la imagen Landsat 8, se la sometió a un preprocesamiento, para corregir las posibles modificaciones que sufre la imagen en su paso por la atmosfera, manipulando los datos crudos o sus niveles digitales (ND). Para ello se realizó la corrección radiométrica y la corrección atmosférica; calculando la radiancia y reflectancia, respectivamente.

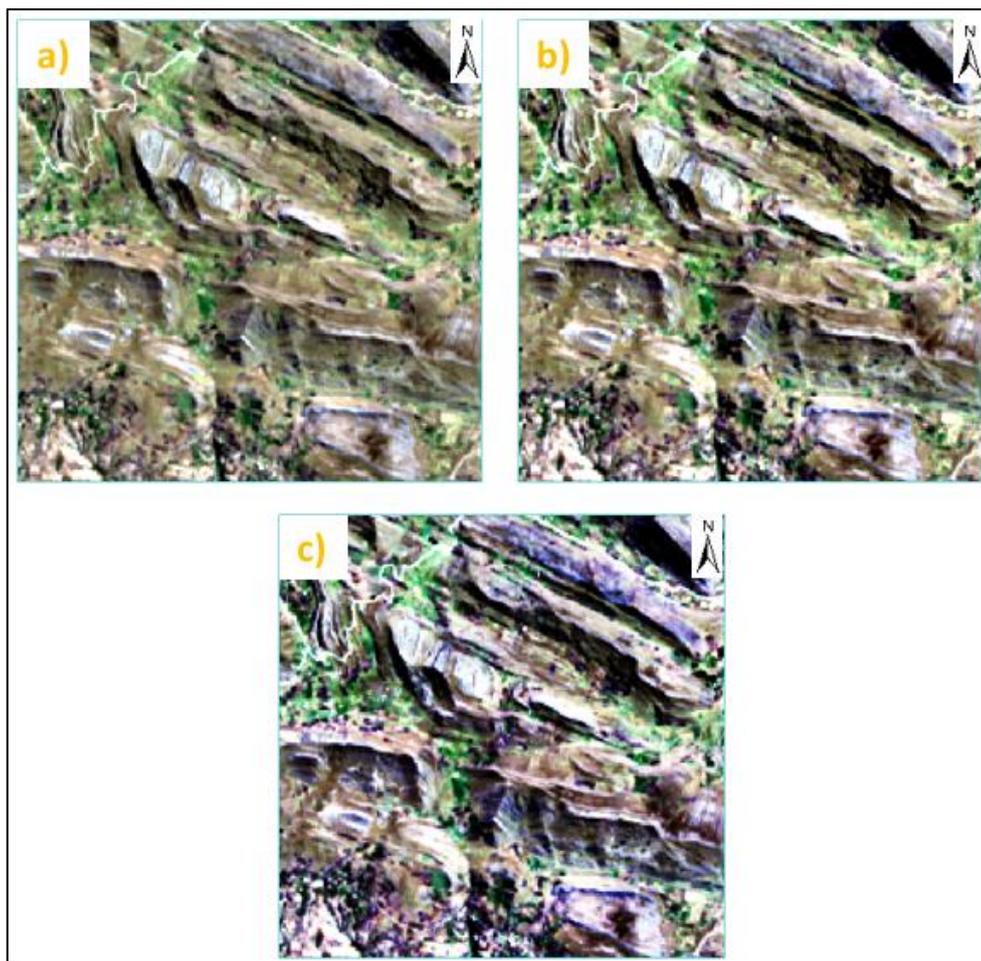


Figura 22. a) Imagen Landsat 8 en ND. b) Radiancia. c) Reflectancia.

3.5.1.3. Procesamiento.

El procesamiento digital de imágenes permite resaltar elementos para percibirlos más fácilmente. El procedimiento utilizado fue el filtrado, el cual permite suprimir o realzar información contenida en la imagen satelital, aplicando operaciones matemáticas básicas. Este filtrado se aplicó fundamentalmente para identificar bordes de características lineales en ciertas direcciones y los patrones de textura que se producen en la imagen como variaciones de tono. Se escogió el filtro de convolución y morfología, y de los diferentes métodos que posee este filtro, el que arrojó mejor resultado fue el filtro High Pass, con un kernel igual 5.

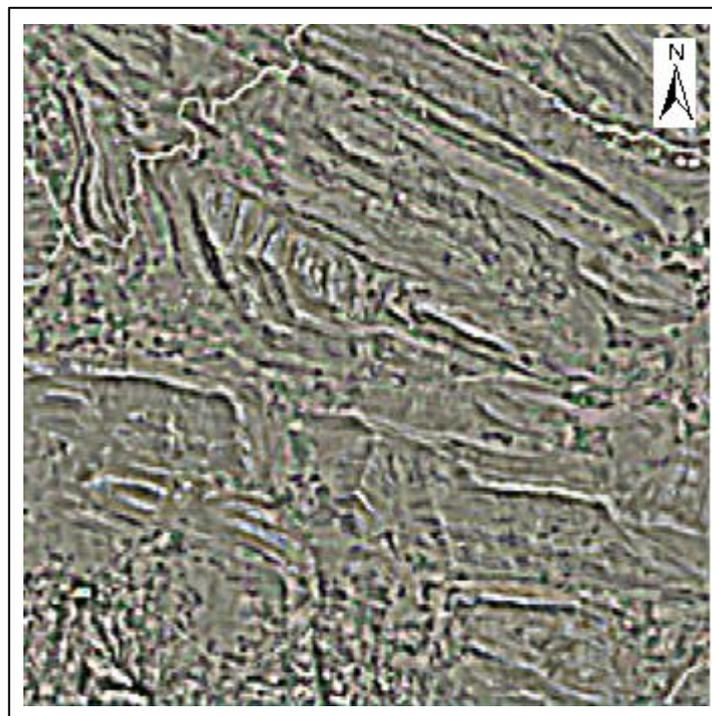


Figura 23. Imagen Landsat 8 con el filtro High Pass de Convolución y Morfología, con kernel de 5.

Luego de la aplicación del Filtro de High Pass, vamos a aplicar filtros con luz artificial dirigida, llamados filtros direccionales; se aplicaron diferentes ángulos para la iluminación artificial (0° , 45° , 90° , 135° y 180°), todos esos filtros presentan características similares, resaltando a los lineamientos de tendencia NW-SE; pero el filtro de dirección 0° , resaltó mejor a los lineamientos de tendencia N-S; y el filtro 45° , resaltó mejor a los lineamientos con tendencia NW-SW y E-W. Entonces a partir de ello solo se trabajó con los filtros de dirección 0° y 45° ; es decir se trabajó con luz artificial con dirección N-S y NE-SW.

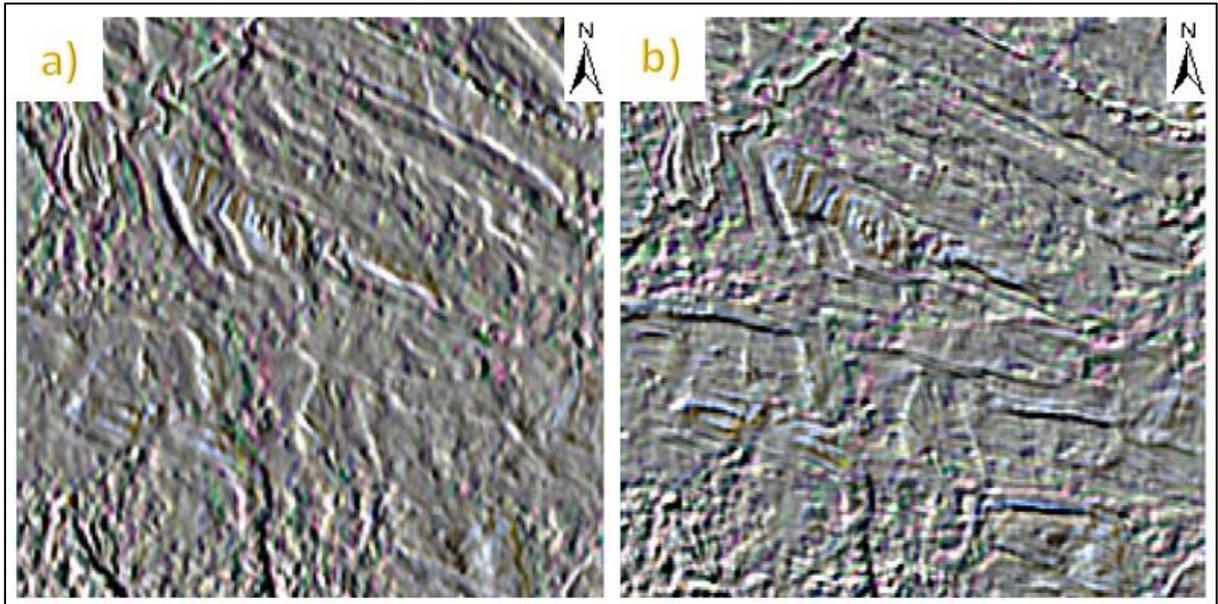


Figura 24. Imagen Landsat 8 con filtros direccionales. a) Imagen con Filtro Direccional a 0°. b) Imagen con Filtro direccional a 45°.

3.5.1.4. Post procesamiento.

Finalizada la etapa del procesamiento de las imágenes satelitales con el software Envi 5.1; al formato propio de ese software, se lo transformó al formato TIFF, que es un formato compatible con ArcGis; con este software vamos a extraer visual y manualmente la información de las imágenes satelitales. De los filtros de convolución y morfología, se identificó lineamientos E-W, N-S y NW-SE; como se aprecia en las siguientes figuras:



Figura 25. Lineamientos E-W, extraídos del Filtro de High Pass, 2021.



Figura 26. Lineamientos N-S, extraídos del Filtro de High Pass, 2021.

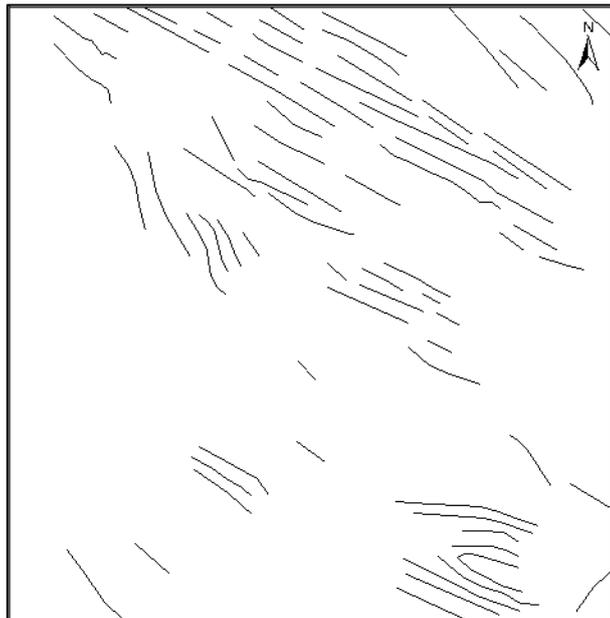


Figura 27. Lineamientos NE-SW, extraídos del Filtro de High Pass, 2021.

En la figura 25 se observa que en la parte central de la imagen se encuentra la mayoría de lineamientos de dirección E-W, los cuales se presentan de forma paralela. En la imagen 26 los lineamientos de dirección N-E, están en la parte central y sur de dicha imagen. Luego en la figura 27 los lineamientos NW-SE, se encuentran en toda la imagen, teniendo una mayor

concentración en la parte norte. Finalmente se unió todos los lineamientos identificados, resultando la siguiente imagen resultante:



Figura 28. Lineamientos totales, extraídos del Filtro de High Pass, 2021.

Luego de extraer la información del Filtro de High Pass; se realizó el mismo procedimiento para los Filtros Direccionales a 0° y 45° desde el norte geográfico; luego digitalizaremos los lineamientos empezando primero por los lineamientos de dirección N-S, luego los E-W y por último los lineamientos NW-SE.

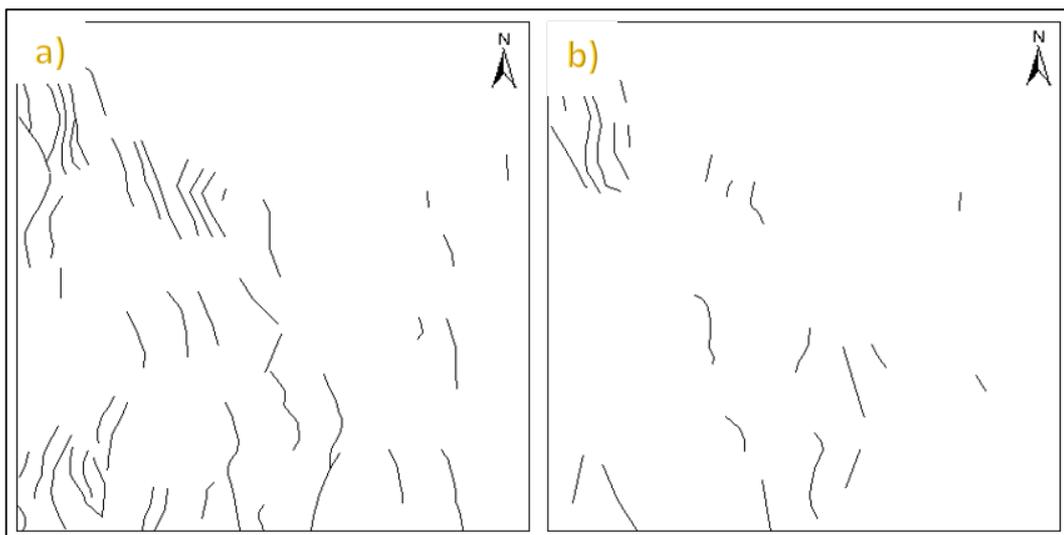


Figura 29. Lineamientos N-S extraídos del Filtro direccional. a) Lineamientos del Filtro direccional a 0° . b) Lineamientos del Filtro direccional a 45° .

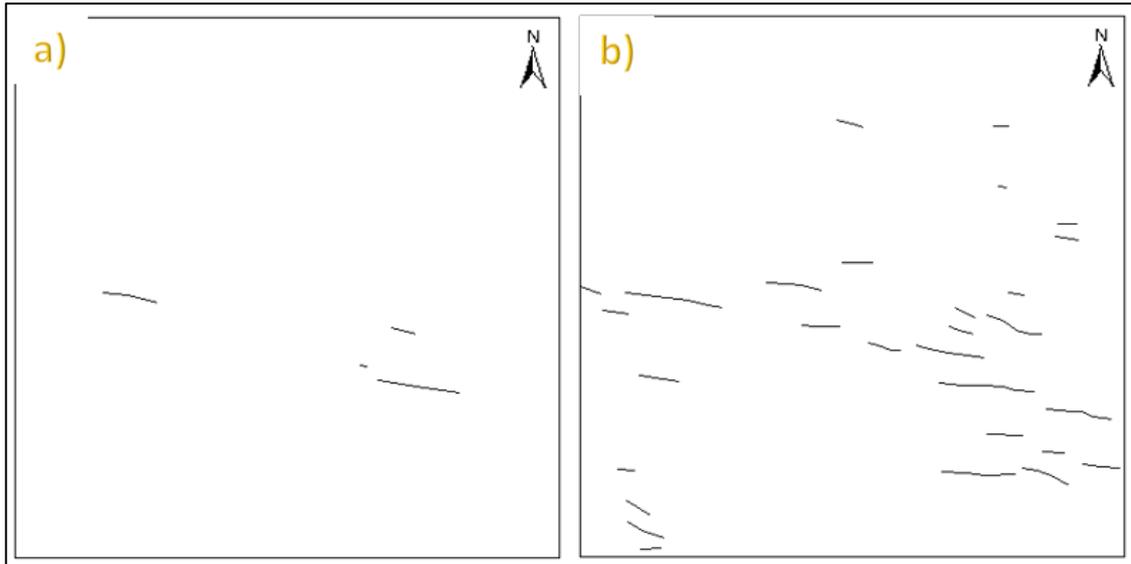


Figura 30. Lineamientos E-W extraídos del Filtro direccional. a) Lineamientos del Filtro direccional a 0° . b) Lineamientos del Filtro direccional a 45° .

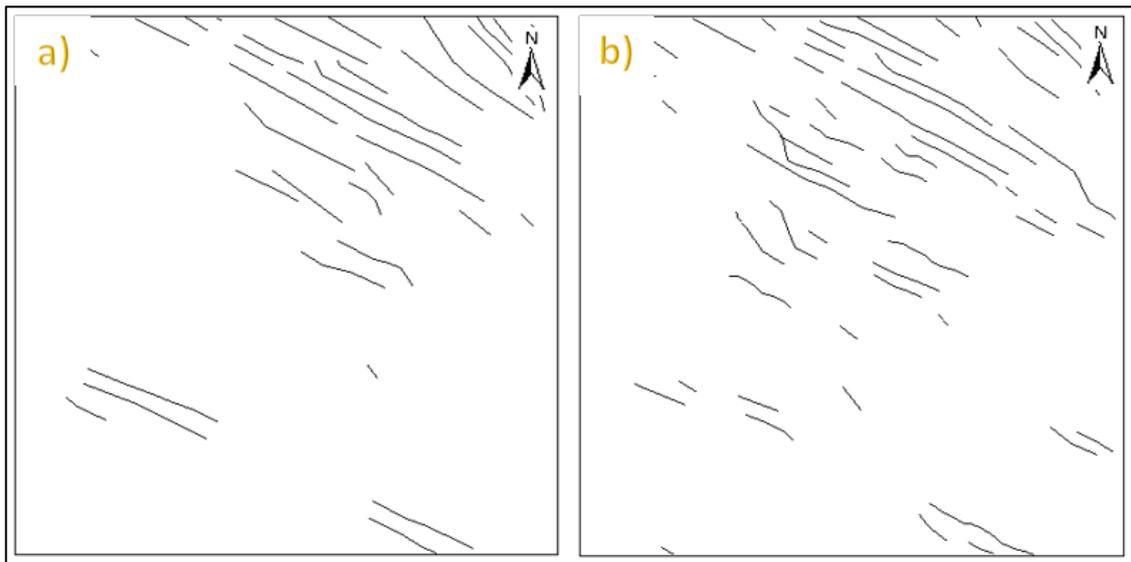


Figura 31. Lineamientos NW-SE extraídos del Filtro direccional. a) Lineamientos del Filtro direccional a 0° . b) Lineamientos del Filtro direccional a 45° .

Finalmente unimos todos los lineamientos identificados, tanto a 0° , como a 45° , quedando las imágenes que se muestran en la figura 32 y figura 33.

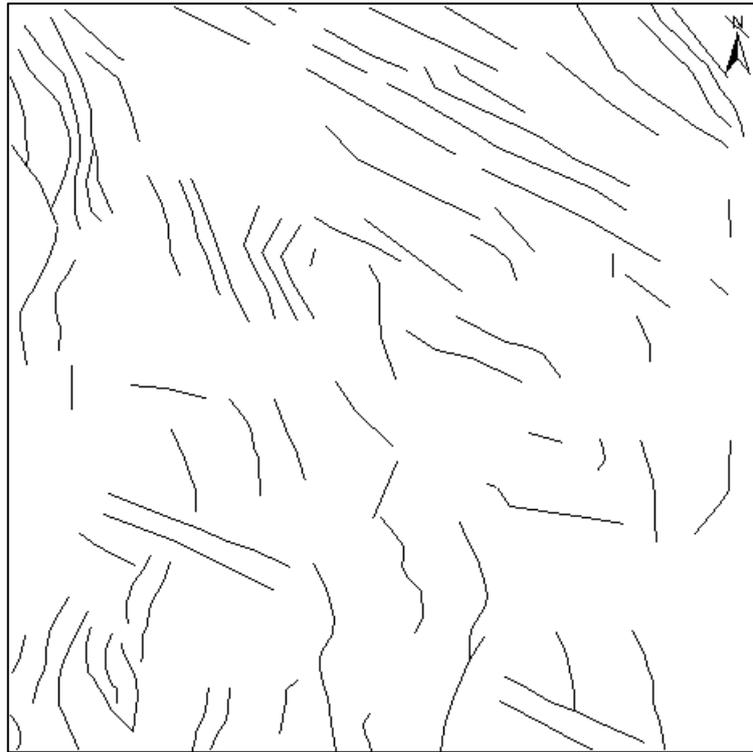


Figura 32. Lineamientos totales del Filtro Direccional a 0°.



Figura 33. Lineamientos totales del Filtro Direccional a 45°.

3.5.2. Interpretación de Imágenes Satelitales 3D con GE.

El objetivo aquí fue identificar las estructuras geológicas a escala macro, para ello nos apoyamos del software GE, en el cual a través de su interfaz 3D, vamos a diferenciar estructuras como pliegues y fallas; para ello se rotó la imagen, en diferentes direcciones, para tener una mejor perspectiva. Como resultado final de este análisis se logró identificar tres pliegues (dos sinclinales y un anticlinal) y dos fallas de gran longitud (cuya cinemática se examinó en las salidas a campo), de aproximadamente 6,5 km; tal y como se observa en la figura 34.

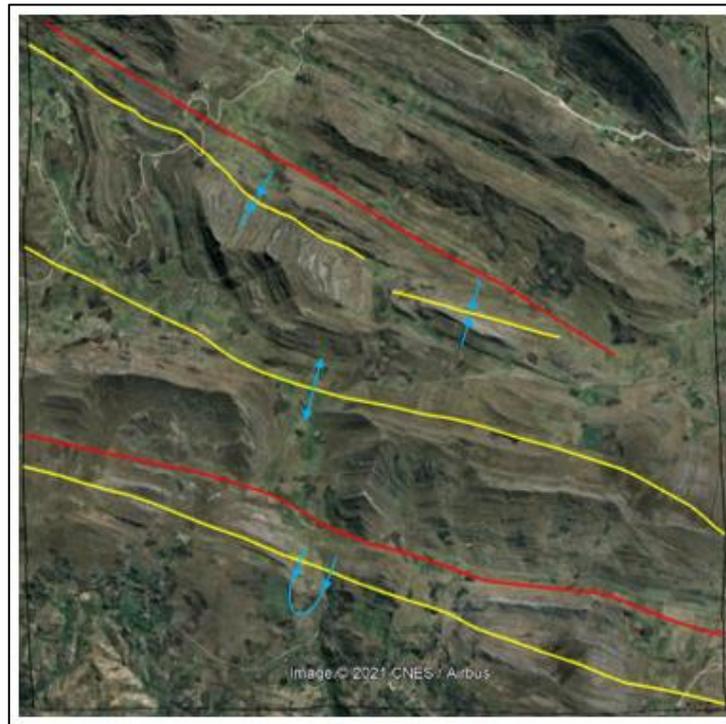


Figura 34. Estructuras Geológicas en Imagen GE, 2021. En rojo Fallas Inversas y en amarillo Pliegues Sinclinal y Anticlinal.

3.6. DIACLASAS.

En total se realizaron 12 estaciones estructurales de diaclasas, en donde se las clasificó según la clasificación hecha por Billings en 1946 y se les tomó datos estructurales de rumbo, buzamiento y dirección de buzamiento. A continuación, se procede a describir las estaciones estructurales:

3.6.1. Estación D-01.

Se identificaron tres familias o clase de diaclasas (de estratificación, buzamiento y rumbo); todas ellas poseen pequeños espaciamentos de 1 a 3 milímetros, con una persistencia menor al metro. Respecto a su génesis, estas diaclasas son extensionales y surgieron tras la formación del anticlinal del Sector la Amistad al cual pertenecen.

Tabla 5. Coordenadas y datos estructurales de diaclasas en la estación D-01.

ESTACIÓN	COORDENADAS			DATUM DE DIACLASA				
	Longitud	Latitud	Cota m.s.n.m.	Azimut	Dip	DD	Clasificación	Símbolo
D-01	809520	9208195	3986	330	30	60	Diaclasa de estratificación	De
				200	80	290	Diaclasa de buzamiento	Db
				133	81	223	Diaclasa de rumbo	Dr

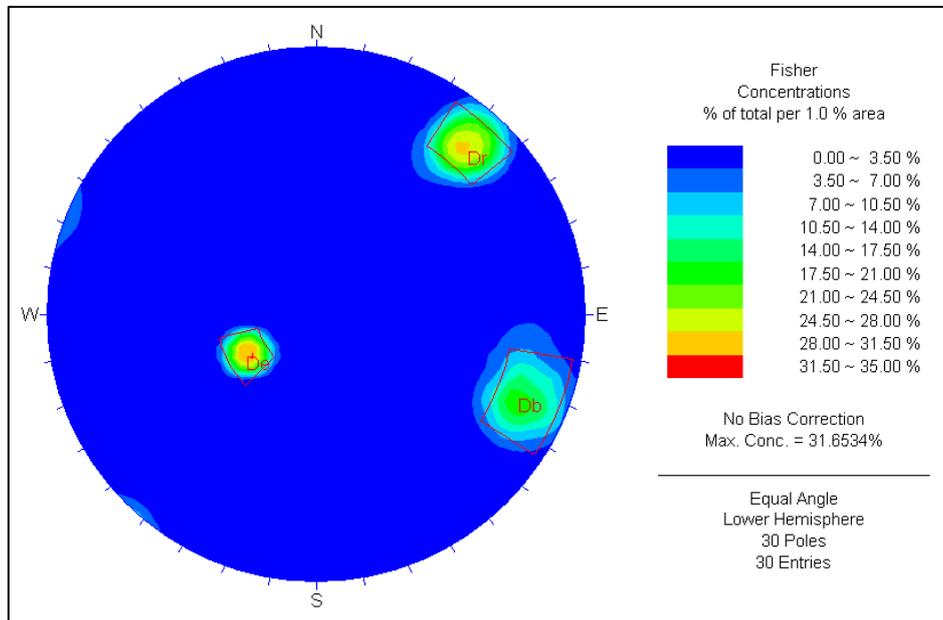


Figura 35. Concentración de Fisher de las diaclasas de la estación D-01.

Se trabajó la data recopilada en campo, con el software Dips 6.0; con el cual se realizó el diagrama de las concentraciones de Fisher. Ahí se observa una mayor concentración de polos

al noroeste y al noreste, existiendo una tercera discontinuidad al sureste, pero en menor concentración; esto indica una clara tendencia de las diaclasas NW-SE y NE-SW.

3.6.2. Estación D-02.

En la segunda estación de diaclasas se realizó en el flanco NW del anticlinal de la estación P-04, ubicada en el Sector La Amistad; se identificó a tres tipos de diaclasas; las diaclasas de estratificación, de buzamiento y diagonales. Genéticamente son fracturas extensionales que se produjeron al formarse el pliegue en el que están inmersas.

Tabla 6. Coordenadas y datos estructurales de diaclasas en la estación D-02.

ESTACIÓN	COORDENADAS			DATUM DE DIACLASA				
	Longitud	Latitud	Cota m.s.n.m.	Azimut	Dip	DD	Tipo	Símbolo
D-02	809928	9207757	4006	305	30	35	Diaclasa de rumbo	De
				210	60	300	Diaclasa de buzamiento	Db
				354	90	260	Diaclasa diagonal	Dd

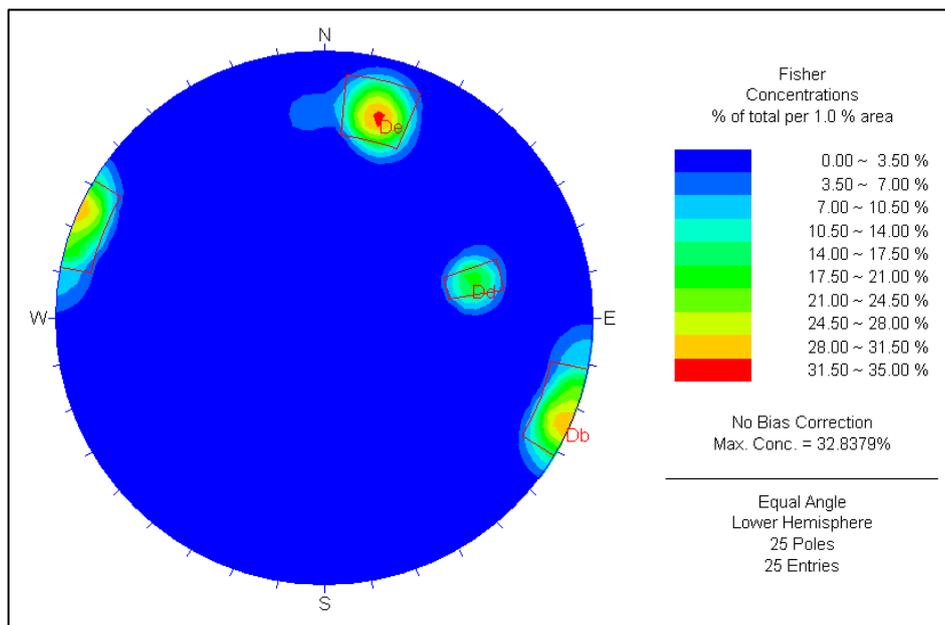


Figura 36. Concentración de Fisher de las diaclasas de la estación D-02.

Aquí vemos que los polos de las diaclasas de esta estación (de rumbo y de buzamiento), presentan tendencias este – oeste, y los polos de las diaclasa de diagonales una concentración sureste.

3.6.3. Estación D-03.

En esta estación se también se identificaron tres familias o clases de diaclasas, (de estratificación, de buzamiento y de diaclasa diagonal), estas a diferencia de la estación anterior están un poco más espaciadas y persistentes. Respecto a su génesis, son de apertura y surgieron tras la formación del anticlinal del Sector la Amistad al cual pertenecen; a su vez están influenciadas por los sets de fallas normales que surgieron después del plegamiento.

Tabla 7. Coordenadas y datos estructurales de diaclasas en la estación D-03.

ESTACIÓN	COORDENADAS			DATUM DE DIACLASA				
	Longitud	Latitud	Cota m.s.n.m.	Azimut	Dip	DD	Tipo	Símbolo
D-03	810035	9207517	3992	285	75	195	Diaclasa de estratificación	De
				201	90	291	Diaclasa de buzamiento	Db
				166	60	256	Diaclasa Diagonal	Dd

Luego de someter la data de las diaclasas al software Dips, se observó que las concentraciones de polos han variado, ahora son más al norte y al sureste, estas son las diaclasas de estratificación y buzamiento; las cuales presentan mayor porcentaje.

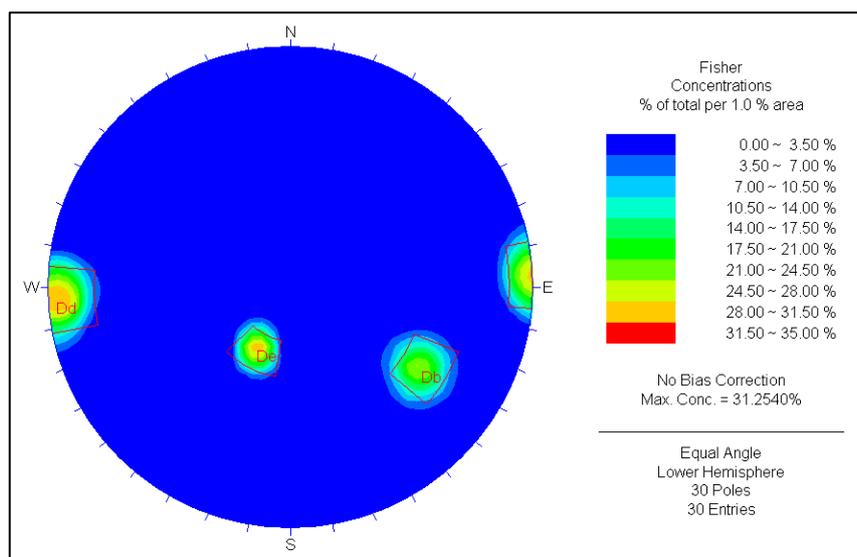


Figura 37. Concentración de Fisher de las diaclasas de la estación D-03.

3.6.4. Estación D-04.

Esta estación fue tomada en el flanco NE del sinclinal volcado en la localidad de Campo Alegre; ahí se identificó a dos familias de diaclasas: las diaclasas de estratificación y diaclasas de buzamiento; estas son las diaclasas típicas que se muestran en pliegues y son diaclasas tensionales producto de la compresión.

Tabla 8. Coordenadas y datos estructurales de diaclasas en la estación D-04.

ESTACIÓN	COORDENADAS			DATUM DE DIACLASA				
	Longitud	Latitud	Cota m.s.n.m.	Azimut	Dip	DD	Tipo	Símbolo
ED-04	813826	9209029	3808	134	60	224	Diaclasa de estratificación	De
				220	61	310	Diaclasa de buzamiento.	Db

Estas diaclasas afloran en la formación Cajamarca y solo presenta dos tipos de diaclasas (De y Db), y los polos de estas tienen tendencias noreste y noroeste, siendo el de mayor porcentaje las diaclasas de buzamiento. La dirección de las diaclasas de estratificación coincide con el eje del plegamiento y las de buzamiento son ortogonales a estas; siendo las diaclasas típicas encontradas en pliegues.

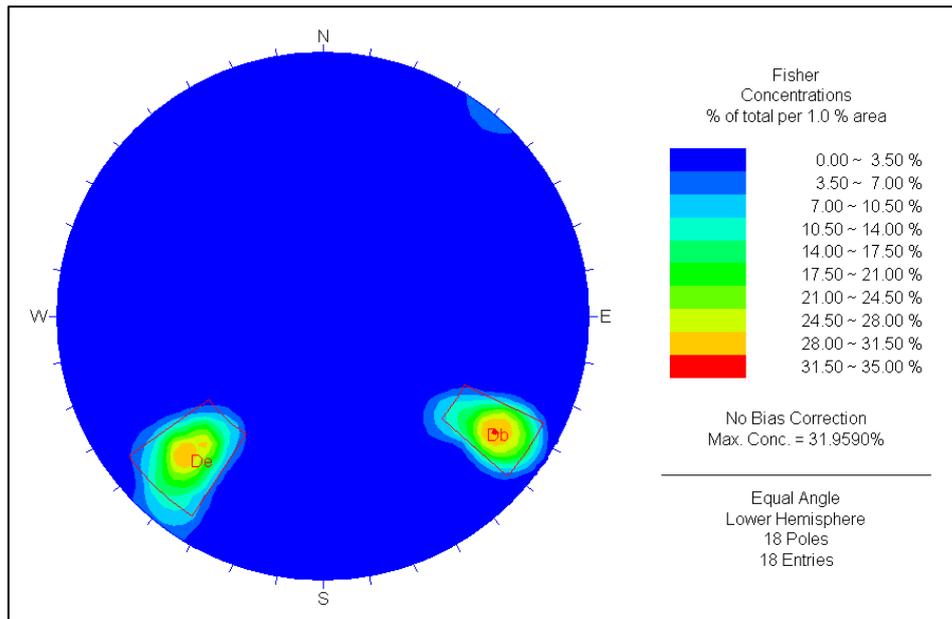


Figura 38. Concentración de Fisher de las diaclasas de la estación D-04.

3.6.5. Estación D-05.

Esta estación se consideró en el mismo sinclinal volcado de la estación D-04, pero en el flanco suroeste; mostrando al igual que el anterior las mismas familias de diaclasas y direcciones similares. Genéticamente son diaclasas de tensión que se formaron como producto de la formación del sinclinal.

Tabla 9. Coordenadas y datos estructurales de diaclasas en la estación D-05.

ESTACIÓN	COORDENADAS			DATUM DE DIACLASA				
	Longitud	Latitud	Cota m.s.n.m.	Azimut	Dip	DD	Tipo	Símbolo
D-05	811441	9209720	3922	125	88	214	Diaclasa de estratificación	De
				192	69	282	Diaclasa de buzamiento	Db

En el siguiente diagrama de Fisher se observa que la concentración de polos de las Diaclasas de estratificación y es mayor que las diaclasas de buzamiento; y que estas tienen una tendencia NW-SE.

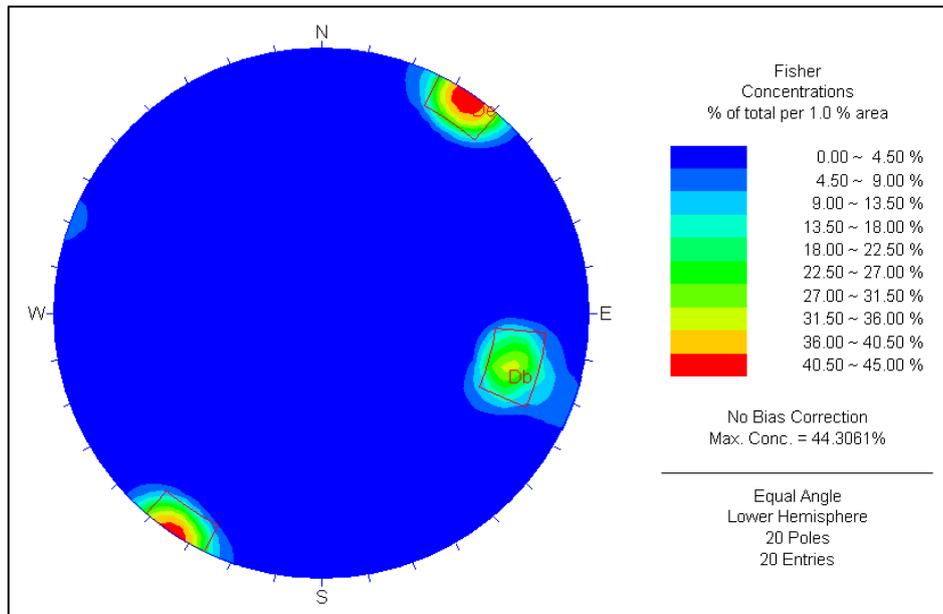


Figura 39. Concentración de Fisher de las diaclasas de la estación D-05.

3.6.6. Estación D-06.

Estación tomada en un anticlinal pequeño, perpendicular al eje del pliegue anticlinal principal, ahí se identificó dos tipos de diaclasas: de estratificación y de buzamiento.

Tabla 10. Coordenadas y datos estructurales de diaclasas en la estación D-06.

ESTACIÓN	COORDENADAS			DATUM DE DIACLASA				
	Longitud	Latitud	Cota m.s.n.m.	Azimut	Dip	DD	Tipo	Símbolo
D-06	809374	9209474	3999	325	90	55	Diaclasa de estratificación	De
				230	89	320	Diaclasa de buzamiento.	Db

Se trató la información recogida con el software Dips 6.0; donde se observa que los polos de las familias de diaclasas tienen tendencia N-S y E-W.

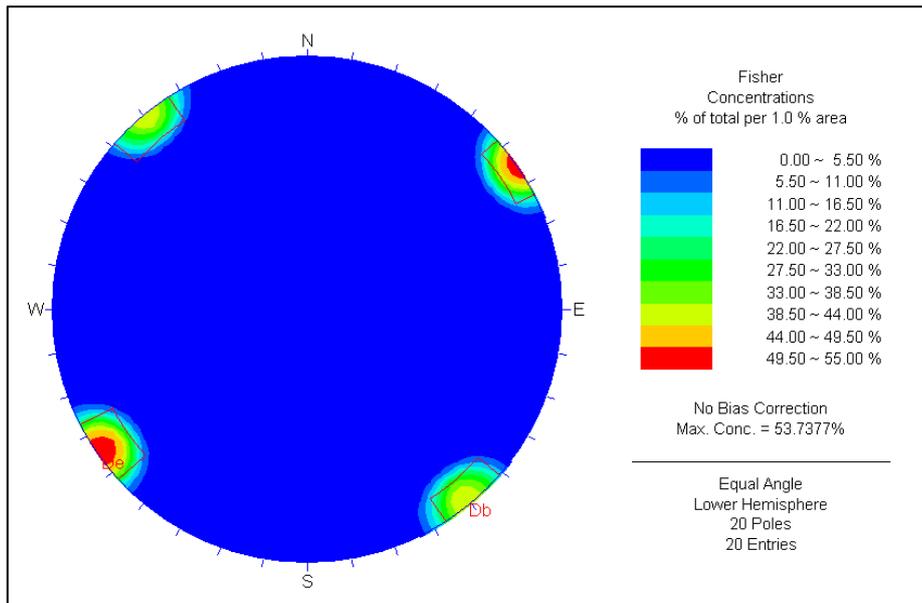


Figura 40. Concentración de Fisher de las diaclasas de la estación D-06.

3.6.7. Estación D-07.

Estación ubicada en el flanco noreste del anticlinal ubicado en el Sector La Amistad, en calizas de la Formación Yumagual, en donde se identificó dos tipos de diaclasas: De y Db.

Tabla 11. Coordenadas y datos estructurales de diaclasas en la estación D-07.

ESTACIÓN	COORDENADAS			DATUM DE DIACLASA				
	Longitud	Latitud	Cota m.s.n.m.	Azimut	Dip	DD	Tipo	Símbolo
D-07	812104	9208122	4047	310	55	40	Diaclasa de estratificación	De
				210	62	30 0	Diaclasa de buzamiento	Db

Al someter la data de campo al software Dips, se observa que los polos de las diaclasas poseen una tendencia NW-SE y NE-SW, de las diaclasas de estratificación Y buzamiento, respectivamente.

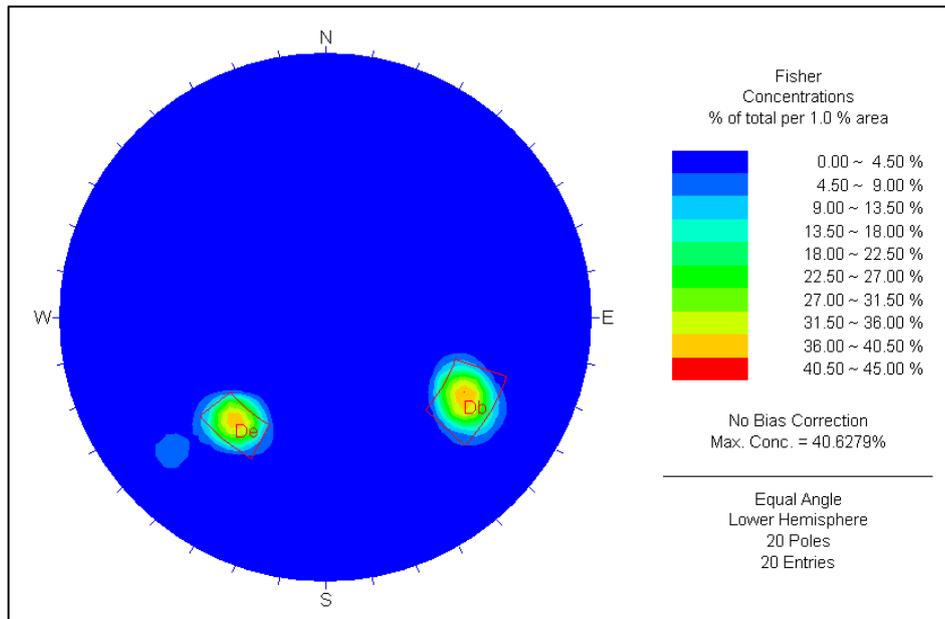


Figura 41. Concentración de Fisher de las diaclasas de la estación D-07.

3.6.8. Estación D-08.

Estación ubicada en el flanco noreste del anticlinal del Sector La Amistad, en calizas de la Formación Yumagual, en donde se identificó dos tipos de diaclasas: de estratificación y de buzamiento.

Tabla 12. Coordenadas y datos estructurales de diaclasas en la estación D-08.

ESTACIÓN	COORDENADAS			DATUM DE DIACLASA				
	Longitud	Latitud	Cota m.s.n.m.	Azimut	Dip	DD	Tipo	Símbolo
D-08	802826	9205458	3867	292	57	22	Diaclasa de estratificación	De
				22	71	112	Diaclasa de buzamiento.	Db

En el diagrama de concentración de Fisher de la estación D-08, se observa que los polos poseen una tendencia noreste y sureste, tendiendo una mayor concentración en las diaclasas de buzamiento.

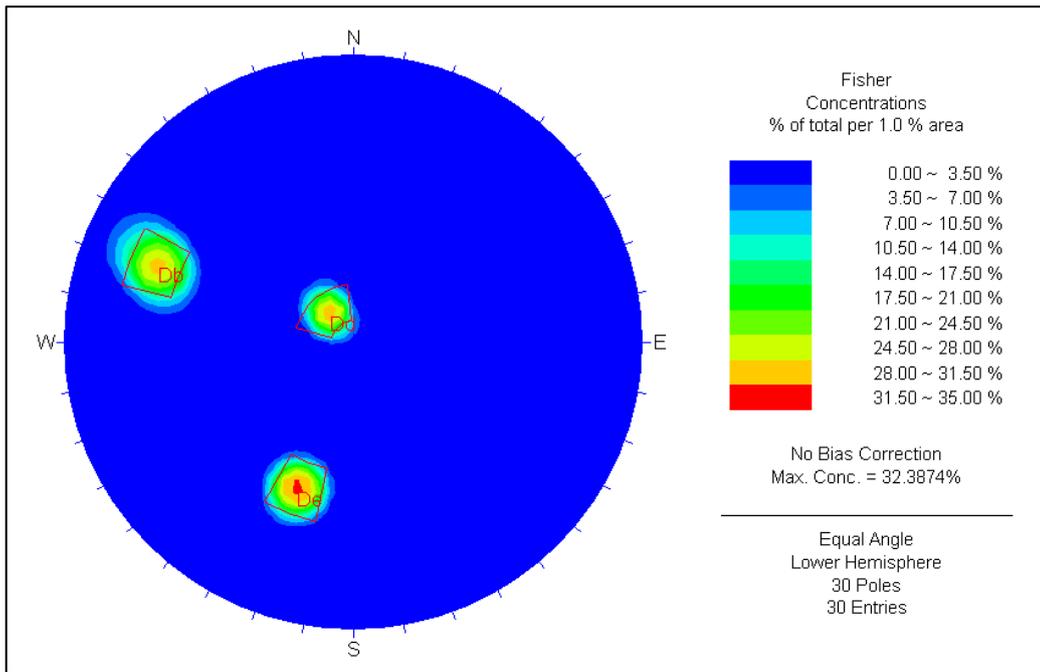


Figura 42. Concentración de Fisher de las diaclasas de la estación D-08.

3.6.9. Estación D-09.

Estación ubicada en el flanco suroeste del Sinclinal volcado de Campo Alegre, en calizas de la Formación Quilquiñan-Mujarrúm, en donde se identificó dos tipos de diaclasas: de estratificación y de buzamiento.

Tabla 13. Coordenadas y datos estructurales de diaclasas en la estación D-09.

ESTACIÓN	COORDENADAS			DATUM DE DIACLASA				
	Longitud	Latitud	Cota m.s.n.m.	Azimut	Dip	DD	Tipo	Símbolo
D-09	812938	9204315	4030	108	87	198	Diaclasa de estratificación	De
				187	80	277	Diaclasa de buzamiento.	Db

En el diagrama de concentración de Fisher de la estación D-09, se observa que los polos poseen una tendencia sureste y suroeste, tendiendo una mayor concentración en las diaclasas de buzamiento.

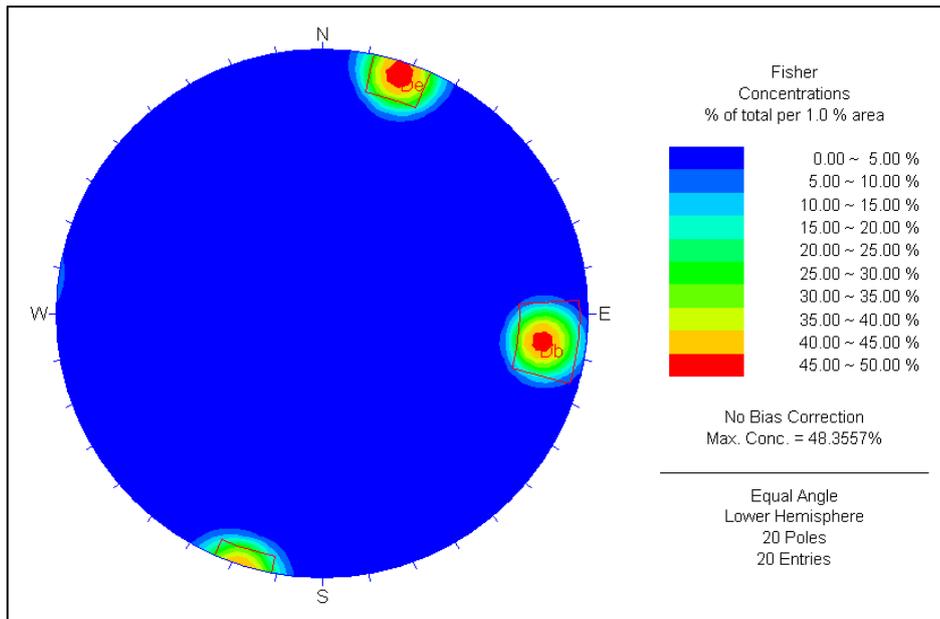


Figura 43. Concentración de Fisher de las diaclasas de la estación D-09.

3.6.10. Estación D-10.

Estación ubicada en el flanco noroeste del Sinclinal del sector la Amistad, en calizas de la Formación Yumagual, en donde se identificó dos tipos de diaclasas: de estratificación y de buzamiento. Los espaciamientos eran mayores que en las estaciones anteriores; aquí el espaciamiento vario de 2 a 5 centímetros.

Tabla 14. Coordenadas y datos estructurales de diaclasas en la estación D-10.

ESTACIÓN	COORDENADAS			DATUM DE DIACLASA				
	Longitud	Latitud	Cota m.s.n.m.	Azimut	Dip	DD	Tipo	Símbolo
D-10	813387	9206527	4047	295	74	41	Diaclasa de estratificación	De
				201	69	291	Diaclasa de buzamiento.	Db

En el diagrama de concentración de Fisher de la estación D-10, se observa que los polos poseen una tendencia sureste y suroeste, tendiendo una mayor concentración en las diaclasas de buzamiento.

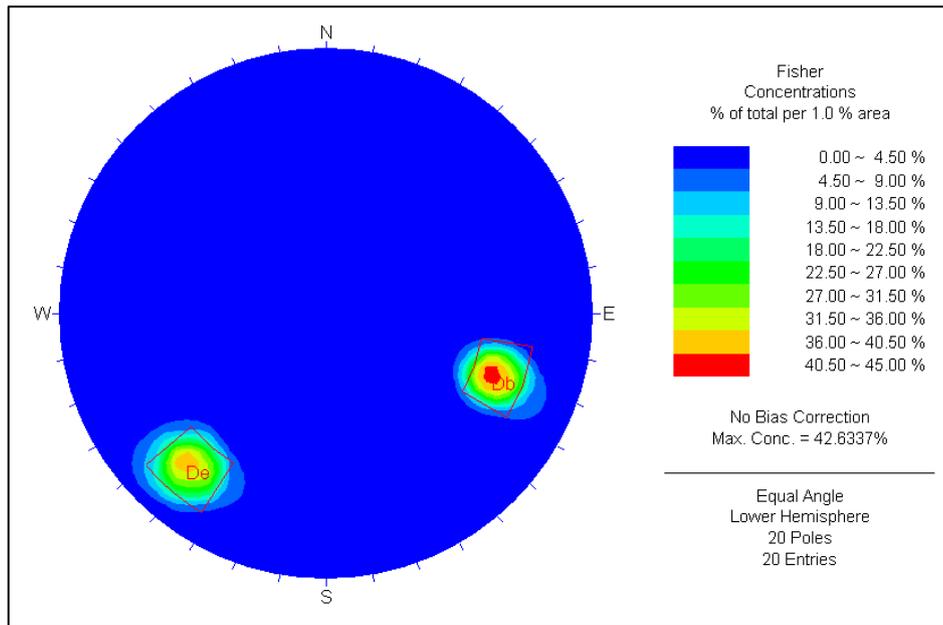


Figura 44. Concentración de Fisher de las diaclasas de la estación D-10.

3.6.11. Estación D-11.

Estación ubicada en el flanco noroeste del Sinclinal de Carbón Bajo, en calizas de la Formación Yumagual; se identificó dos tipos de diaclasas: de estratificación y de buzamiento. Estas diaclasas poseen un espaciamiento que oscila entre 5 cm y 10 cm; estas diaclasas no poseen relleno.

Tabla 15. Coordenadas y datos estructurales de diaclasas en la estación D-11.

ESTACIÓN	COORDENADAS			DATUM DE DIACLASA				
	Longitud	Latitud	Cota m.s.n.m.	Azimut	Dip	DD	Tipo	Símbolo
D-11	819482	9205043	4047	100	72	190	Diaclasa de estratificación	De
				14	71	104	Diaclasa de buzamiento.	Db

En el diagrama de concentración de Fisher de la estación D-11, se observa que los polos poseen una tendencia sureste y suroeste, tendiendo una mayor concentración en las diaclasas de buzamiento.

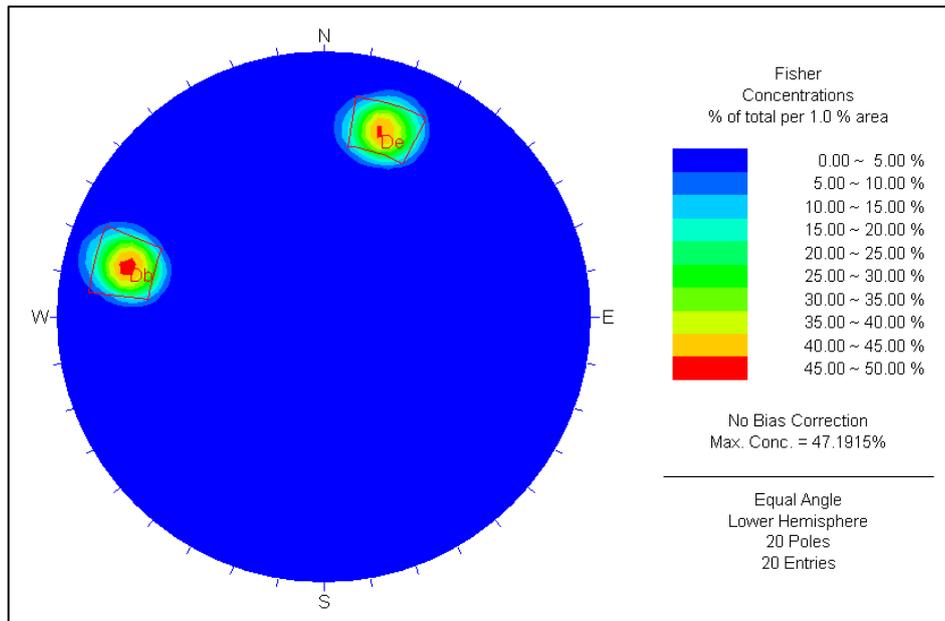


Figura 45. Concentración de Fisher de las diaclasas de la estación D-11.

3.6.12. Estación D-12.

Estación ubicada en el flanco noroeste del Sinclinal de Carbón Bajo, en calizas de la Formación Cajamarca; ahí se identificó dos tipos de diaclasas: de estratificación y de buzamiento. Estas diaclasas poseen un espaciamiento que oscila entre 5 cm y 20 cm; que la igual que las anteriores estaciones, en esta no hay la presencia de relleno.

Tabla 16. Coordenadas y datos estructurales de diaclasas en la estación D-12.

ESTACIÓN	COORDENADAS			DATUM DE DIACLASA				
	Longitud	Latitud	Cota m.s.n.m.	Azimut	Dip	DD	Tipo	Símbolo
D-12	808027	9206800	4014	98	52	188	Diaclasa de estratificación	De
				3	77	95	Diaclasa de buzamiento.	Db
				50	58	140	Diaclasa diagonal.	Dd

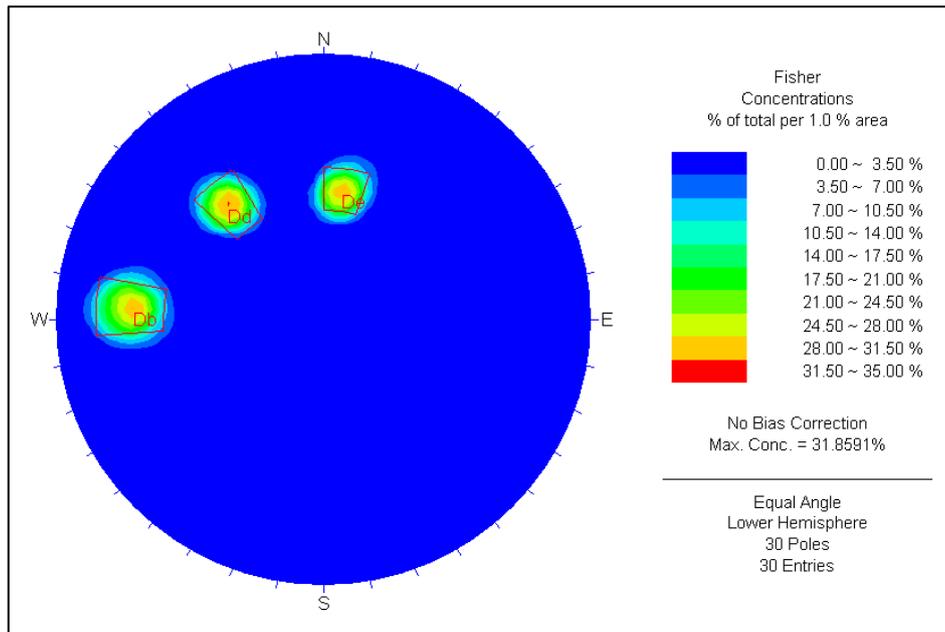


Figura 46. Concentración de Fisher de las diaclasas de la estación D-12.

3.7. FALLAS.

Previamente a los trabajos de campo, se recopiló información de las estructuras en la zona de estudio; no obstante, dicha información es resultado del cartografiado a escala 1:10000, realizado por el INGEMMET; el cual es muy general e insuficiente para el análisis planteado. Paralelamente con el apoyo de imágenes satelitales, se realizaron salidas a campo con el fin reconocer las estructuras tectónicas y de obtener la información estructural necesaria para lograr los objetivos de la presente tesis.

Las fallas identificadas en campo son Fallas Traslacionales de cinemática inversa, normal, sinistral, inversa-dextral e inversa-sinistral; esta última cinemática, se manifiesta en fallas extensas de carácter regional y crean una zona de transpresión, la cual es producida por la componente de desgarre en el acortamiento cortical; la cual genera estructuras extensionales y compresionales. Se realizó 13 estaciones estructurales en las cuales se pudo apreciar que las fallas tienen una orientación NW-SE y NE-SW. A continuación, se describen las estaciones estructurales de fallas:

3.7.1. Estación F-01.

En esta estación se evidenció dos Fallas de cinemática normal, de rumbo NW-SE; emplazadas en el flanco NE del sinclinal volcado ubicado en el caserío de Campo Alegre,

en calizas de la Formación Cajamarca. Ambas fallas presentan escarpes falla pronunciados, con un salto de falla promedio de 3 metros; en su plano de falla, se identificó fracturas extensionales horizontales y oblicuas al plano de falla en donde no se evidenció estrías para determinar la cinemática de su último movimiento; pero gracias a su escarpe de falla, geometría y sus fracturas extensionales; se le identificó la cinemática normal.

Tabla 17. Coordenadas y datos estructurales de las Fallas Normales de la estación F-01.

ESTACIÓN	COORDENADAS			DATUM DE FALLA				
	Longitud	Latitud	Altitud m.s.n.m.	Azimut	Dip	DD	Pitch	Cinemática
F-01	813074	9209476	3940	120	77	214	-	Normal
	813070	9209481	3945	125	78	215	-	Normal

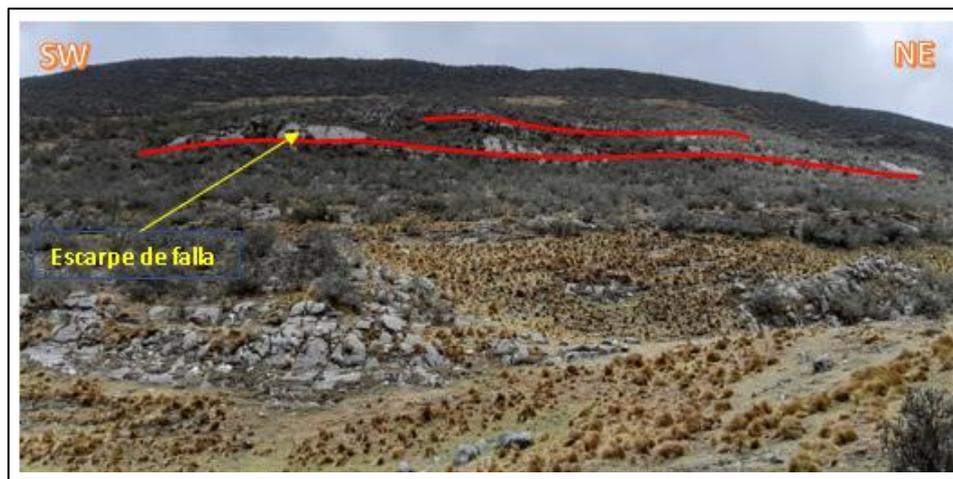


Foto 10. Escarpes de Fallas Normales.

Longitud: 811217, Latitud: 9209208 y Altitud: 3900 m.s.n.m.

Las fracturas extensionales, las cuales no presentan relleno y tiene una persistencia de algunos metros. Estos indicadores sirvieron para calcular la cinemática de fallas. Para hallar dicha cinemática, se utilizó del criterio T (ver foto 11b); por el cual se deduce que el bloque piso baja y el bloque techo sube, por lo que se las clasificó como Fallas Normales.

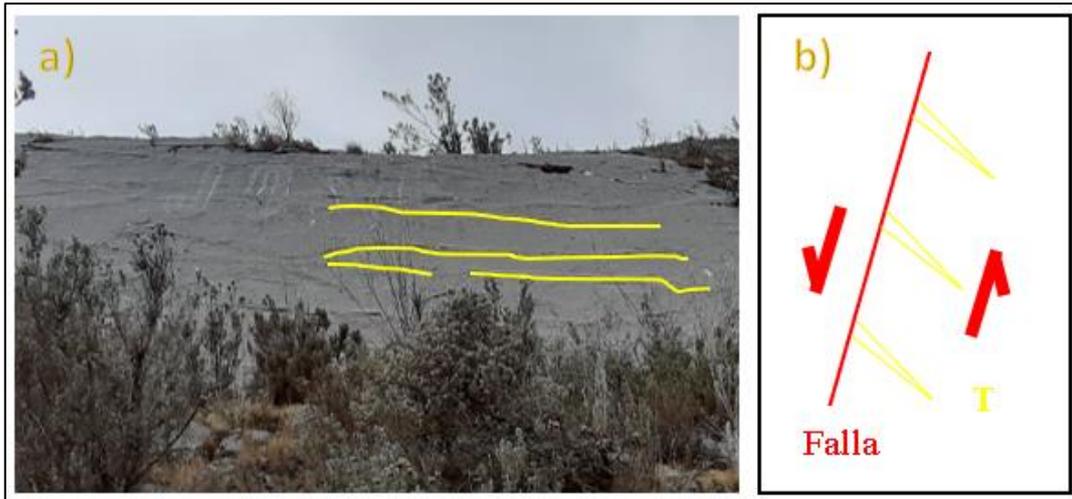


Foto 11. a) Fracturas Tensionales (color amarillo). b) Interpretación cinemática del fallamiento normal (vista de perfil).

Longitud: 812978, Latitud: 9209689 y Altitud: 3936 m.s.n.m.

Existen dos tipos de fracturas extensionales en echelón en el plano de falla son oblicuas y paralelas. Estas fracturas están rellenas de caliza de una coloración gris oscura y se presentan en dos direcciones la primera paralela al plano de falla, presentando un azimut de $N125^\circ$ y están buzando al noroeste; estas fracturas están asociadas con la elevación de las Formaciones. El segundo grupo, son de formación posterior y poseen un azimut de $N45^\circ$ y de ellas se puede inferir que hubo un movimiento de extensión en la dirección NW-SE.

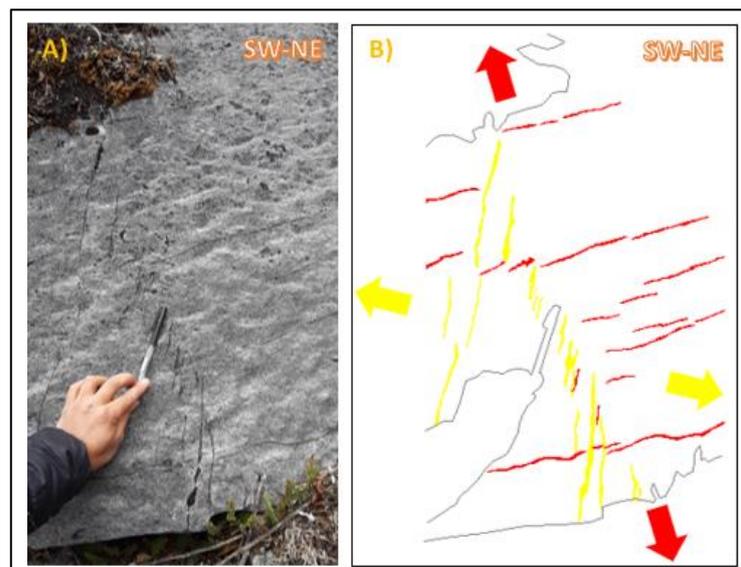


Foto 12. Fracturas extensionales. A) Foto. B) Interpretación cinemática la extensión.

Longitud: 813076, Latitud: 9209476 y Altitud: 3945 m.s.n.m.

3.7.2. Estación F-02.

En la estación F-02, se identificó una falla con un azimut N70°, aflorante en los estratos invertidos del Sinclinal Volcado del caserío de Carbón alto, en el flanco SW, a unos 500 metros del desvío a Carbón Alto; esta falla aflora en Calizas de la Formación Quilquiñán Mujarrún.

Tabla 18. Coordenadas y datos estructurales de la Falla Inversa de la estación F-02.

ESTACIÓN	COORDENADAS			DATUM DE FALLA				
	Longitud	Latitud	Altitud m.s.n.m.	Azimut	Dip	DD	Pitch	Cinemática
F-02	808000	9206551	3953	100	45	190	90	Inversa



Foto 13. Falla Inversa en calizas de la Formación Quilquiñán Mujarrún

Longitud: 808012, Latitud: 9206600 y Altitud: 3953 m.s.n.m.

Debido a planos de recristalización, se definió que la última cinemática de esta falla fue inversa; es decir que el bloque techo ascendió respecto del bloque piso, la compresión que la originó provocó la recristalización de carbonato de calcio (CaCO_3) en las rocas calizas, dando las fibras de recristalización. A este evento se lo puede correlacionar con la Fase Tectónica Inca I.

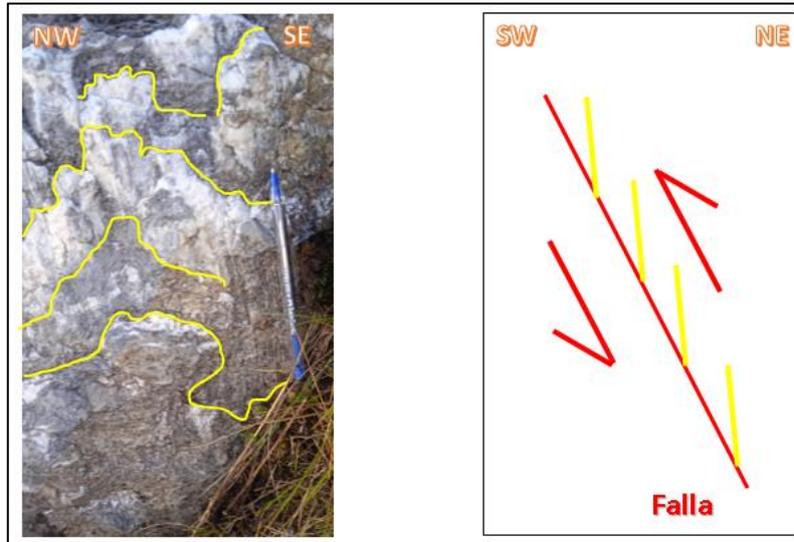


Foto 14. a) Recristalización de CaCO_3 . b) Interpretación cinemática del fallamiento inverso.

Longitud: 808012, Latitud: 9206600 y Altitud: 3953 m.s.n.m.

El plano de falla presenta estrías, las cuales se las ingresa a una estereofalsilla con ayuda del software Faulkin; de eso se obtiene que el eje de deformación principal mayor está orientado al NW con tendencia a la vertical (plunge = 75°), mientras que en eje principal de deformación menor está orientado al SW, casi en la horizontalidad; por último, en eje intermedio está paralelo al plano de falla, tal y como lo provee la teoría.

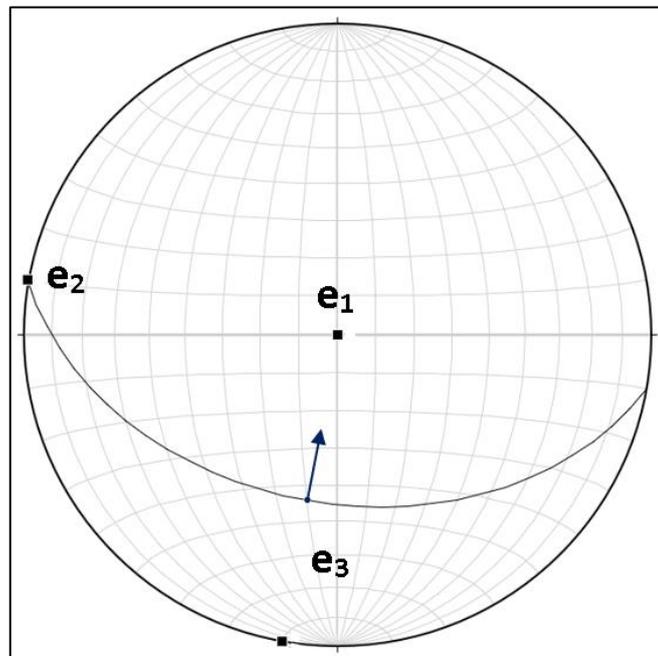


Figura 47. Red de Smith con la dirección de ejes principales de deformación de la Falla Inversa de la estación F-02.

Tabla 19. Ejes principales de deformación en la estación F-02.

Ejes principales de deformación	Trend	Plunge
Eje mayor (e_1)	90	90
Eje intermedio (e_2)	280	0
Eje menor (e_3)	190	0

3.7.3. Estación F-03.

En el corte de la carretera a Huanico se identificó, en la Formación Cajamarca, a dos fallas cercanas; las cuales poseen un rumbo NW-SE y buzanan hacia el NE.

Tabla 20. Coordenadas y datos estructurales de las Fallas Inversas de la estación F-03.

ESTACIÓN	COORDENADAS			DATUM DE FALLA				
	Longitud	Latitud	Altitud m.s.n.m.	Azimut	Dip	DD	Pitch	Cinemática
F-03	810777	9210158	3863	325	85	35	87	Inversa
	811392	9209871	3883	315	75	45	85	Inversa

Por el buzamiento elevado de los planos de falla y siguiendo la teoría del fallamiento dinámico de Anderson, son fallas de cinemática normal; pero sus planos de recristalización de calcita, al igual que la estación anterior, nos indica que su cinemática es inversa, ya que el bloque techo asciende respecto al bloque piso. De esto se infiere que las fallas tuvieron dos cinemáticas distintas, la primera fue normal, resultando de una extensión local y la segunda fue inversa, que según la figura 48 se correlaciona con la Fase Tectónica Inca II.

El datum de las estrías del plano de falla se introduce al programa Faulking; ahí se observa que esta falla además del movimiento inverso, tuvo una ligera componente sinistral (ver figura 48). Esto es porque las estrías no son completamente verticales a la dirección del plano de falla.

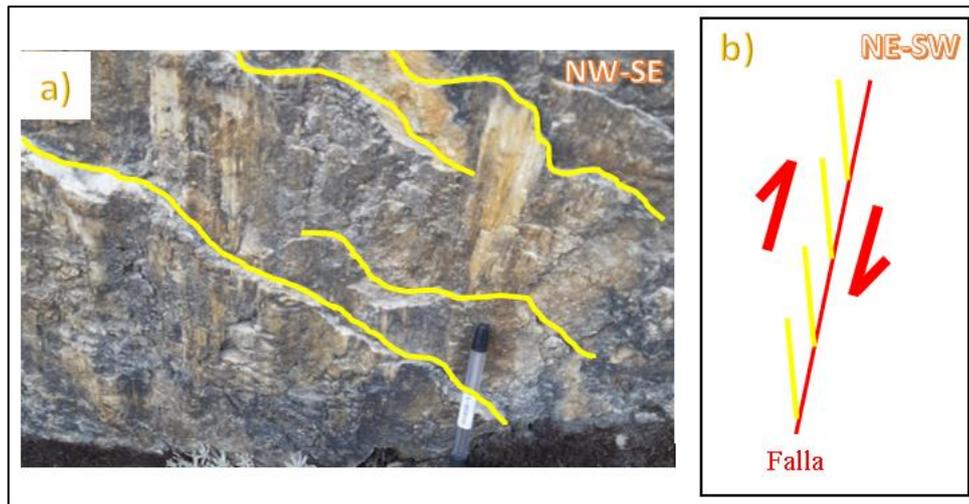


Foto 15. a) Recristalización de CaCO_3 con estrías de falla. b) Interpretación de la cinemática del fallamiento inverso (vista de perfil).

Longitud: 810770, Latitud: 9210150 y Altitud: 3870 m.s.n.m.

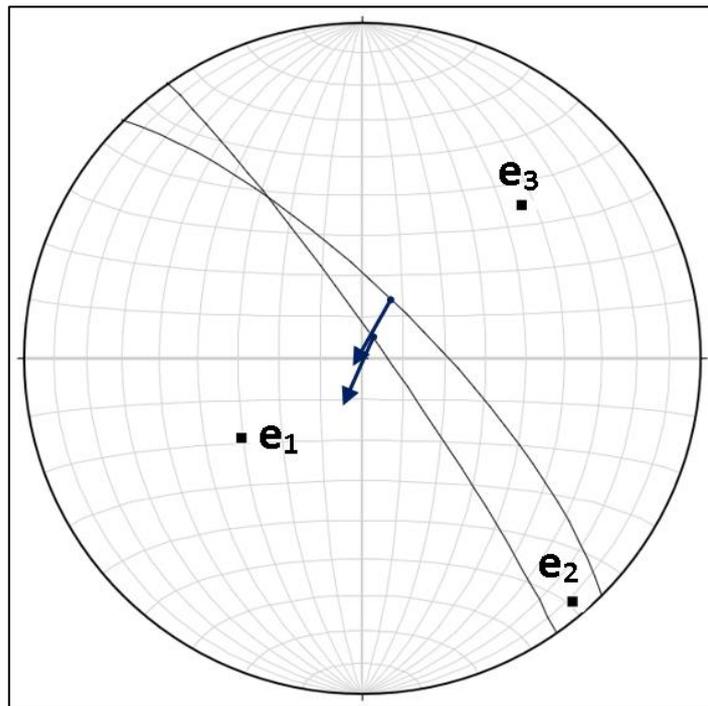


Figura 48. Red de Smith con la dirección de ejes principales de deformación de la Falla Inversa.

Además, al colocar su Datum de las estrías y las fallas en una Red de Smith; se observa que la última deformación fue compresional y elevó el sistema hacia el SW; ósea el eje principal mayor de la deformación (e_1), la máxima deformación, está orientada al SW ($N212^\circ$); la cual es la dirección opuesta del buzamiento de la falla y posee un plunge de 55° . El eje de

deformación menor, se generó en la dirección NE-SW. El eje intermedio de deformación está paralelo al plano de falla, tal y como predice la teoría. A continuación, se presenta el trend y plunge de los ejes principales de deformación:

Tabla 21. Ejes principales de deformación de la estación F-03.

Ejes principales de deformación	Trend	Plunge
Eje mayor (e_1)	236	55
Eje intermedio (e_2)	139	5
Eje menor (e_3)	46	35

3.7.4. Estación F-04.

En esta estación se agrupó a una familia de cuatro Fallas Normales, las cuales poseen un azimut de que varía entre $N60^\circ$ y $N80^\circ$ y un buzamiento promedio de 75° al NE. Estas fallas afloran en el flanco NE del Anticlinal del Sector La Amistad. Ninguna de estas fallas presenta estrías, ya que en sus planos de falla se formaron pequeñas quebradas en las cuales el agua las ha ido erosionando; esto impidió estudiar la cinemática de deformación con el software Faulking; así que solo nos basaremos en la cinemática interpretada en campo según sus relaciones geométricas y estratigráficas.

Tabla 22. Coordenadas y datos estructurales de las Fallas Normales de la estación F-04.

ESTACIÓN	COORDENADAS			DATUM DE FALLA				
	Longitud	Latitud	Altitud m.s.n.m.	Azimut	Dip	DD	Pitch	Cinemática
F-04	809591	9207950	4030	60	72	150	-	Normal
	809692	9207717	4034	80	80	160	-	Normal
	809823	9207637	3952	75	75	165	-	Normal
	809925	9207291	3981	79	77	169	-	Normal

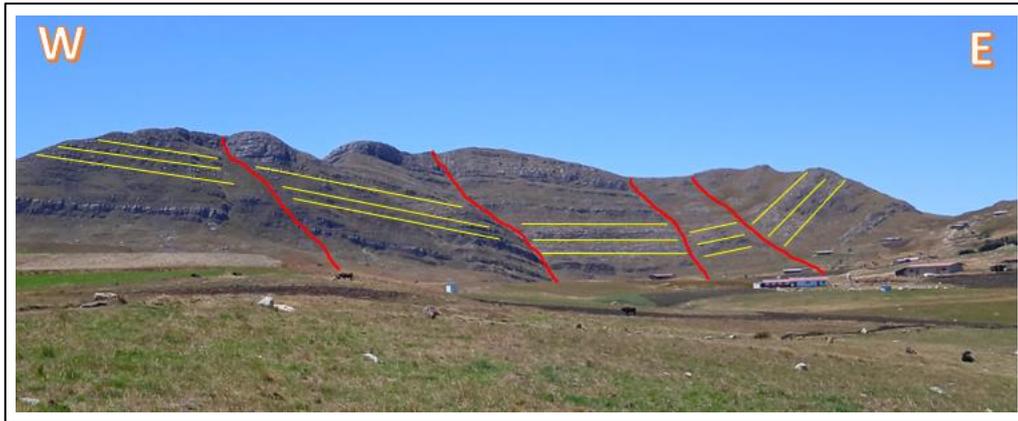


Foto 16. Set de Fallas Normales.

Longitud: 809523, Latitud: 9207889 y Altitud: 3960 m.s.n.m.

3.7.5. Estación F-05.

En la Formación Yumagual, aflora una falla regional cuyo plano no aflora en superficie, pero se pudo reconocer a esta falla debido al cambio brusco de buzamiento en su bloque techo y piso. Posee una dirección NW-SE y su buzamiento está orientado al SW; esto se dedujo por la estratigrafía de la zona y las fallas de similar azimut, vistas anteriormente.

Se infiere que esta falla se desplazó por el plano de estratificación; por ende, su buzamiento de 70°, por lo que es una falla de alto ángulo; y que, siguiendo la Teoría de Anderson, la cinemática de esta falla fue normal y como estas fallas son extensionales, se generó producto de una extensión local. Analizando la estratigrafía, se observa que el bloque techo ascendió, respecto al bloque piso; por lo que su movimiento también fue inverso. Estas características cinemáticas son las mismas que las estaciones anteriores F-02 y F-03.

Tabla 23. Coordenadas y datos estructurales de la Falla Inversa Sinistral de la estación F-05.

ESTACIÓN	COORDENADAS			DATUM DE FALLA				
	Longitud	Latitud	Altitud m.s.n.m.	Azimut	Dip	DD	Pitch	Cinemática
F-05	810652	9210190	3862	315	70	215	-	Inversa Sinistral

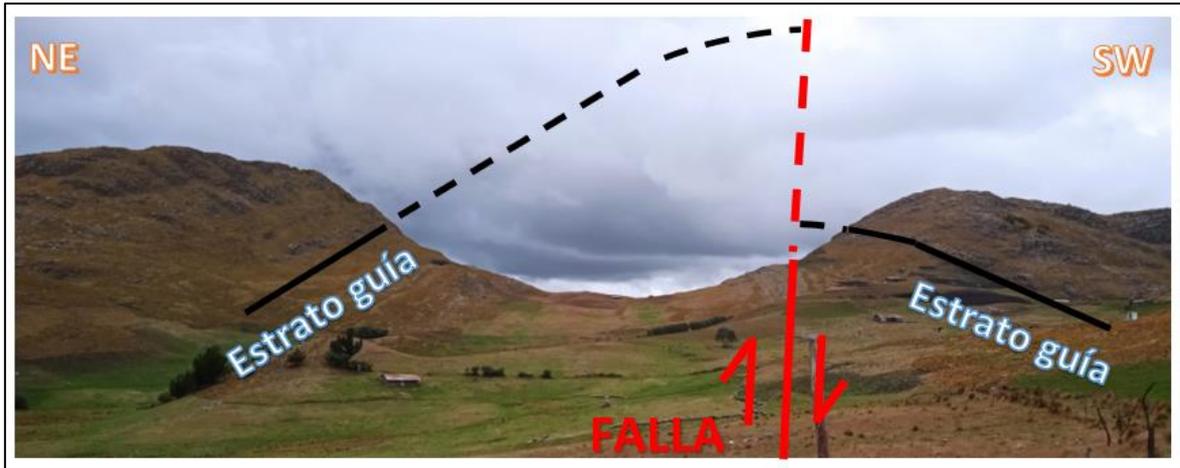


Foto 17. Falla Inversa-Sinestral (en color rojo), en vista de perfil, de la estación F-05.

Este: 809676, Norte: 9209728 y Altitud: 4019 m.s.n.m.

Analizando las Fallas de Rumbo de la estación F-08, tomándolas como planos de Riedel y partiendo del modelo de cizalla de Ramsay; se deduce, que la falla tiene también una componente sinestral; aparte de ello, la estratigrafía de las Formaciones a una escala más amplia, se corrobora esta aseveración. Así mismo analizando las direcciones de las foliaciones, como se observa en la figura 49; corrobora el movimiento sinestral de esta falla. También las fracturas en echelón encontradas en el anticlinal del Sector la Amistad, nos da una zona de cizalla, la cual evidencia mejor esta componente sinestral.

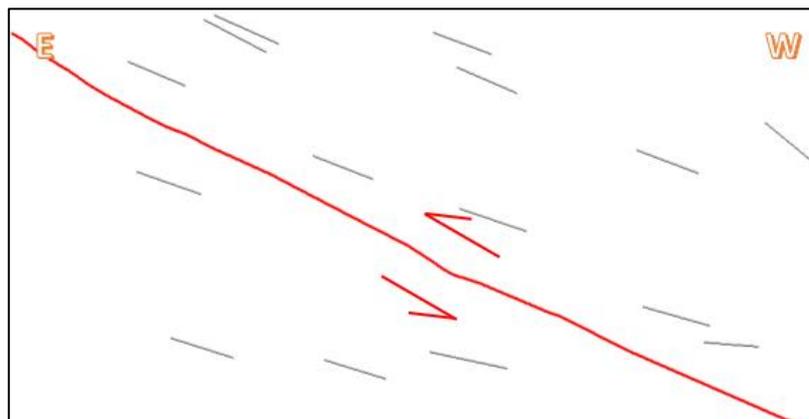


Figura 49. Componente sinestral interpretada a partir de foliaciones (Falla Inversa-sinestral de color rojo, Foliaciones de color negro).

3.7.6. Estación F-06.

La falla de esta estación también es una falla regional y es la conjugada de la estación anterior; ocurre entre rocas de la Formación Cajamarca y de la Formación Quilquiñan Mujarrúm. Esta falla se ubica al sur del área de estudio, entre el Anticlinal del sector La Amistad y Sinclinal volcado del caserío de Carbón Alto y Bajo.

Tabla 24. Coordenadas y datos estructurales de la Falla Inversa Sinistral de la estación F-06.

ESTACIÓN	COORDENADAS			DATUM DE FALLA				
	Longitud	Latitud	Altitud m.s.n.m.	Azimut	Dip	DD	Pitch	Cinemática
F-06	812964	9205065	3862	130	80	220	70	Inversa Sinistral

Esta estructura posee un rumbo NW-SE y un buzamiento de 80° al SW. La falla tiene un ángulo de buzamiento similar al de su conjugada, por lo que es de alto ángulo y se le atribuye que tuvo un fallamiento normal. Aquí si se encontró plano de falla y este mostró fibras de recristalización, las cuales nos indican que tuvo un segundo movimiento inverso con una componente sinistral; además de ello sus relaciones estratigráficas, en donde se repiten Formaciones, corroboran dicha cinemática inversa.

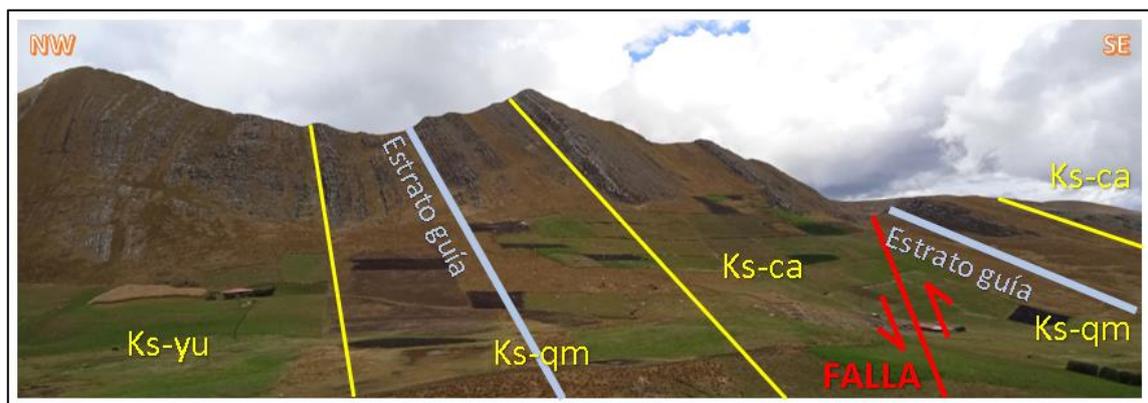


Foto 18. Vista de perfil, donde se observa la componente inversa de la Falla Inversa-Sinistral de la estación F-06.

Longitud: 809992, Latitud: 9206009 y Altitud: 3956 m.s.n.m.

Se analizó los datos en el software Faulking, de la estación F-06 junto con la estación F-05; esto debido a que estas poseen la misma dirección de falla y de buzamiento, se infiere que se generaron para el mismo evento tectónico. De los resultados que arroja la estereofalsilla,

se observó que, posee una cinemática de sinistral además de la inversa; por lo que es una Falla Inversa-Sinistral. Además, la dirección de la deformación principal tiene una tendencia al norte, con un plunge elevado de 70° , lo que indica una elevación del sistema; el eje de deformación principal menor posee una tendencia cercana a E-W. El eje principal intermedio está al SE.

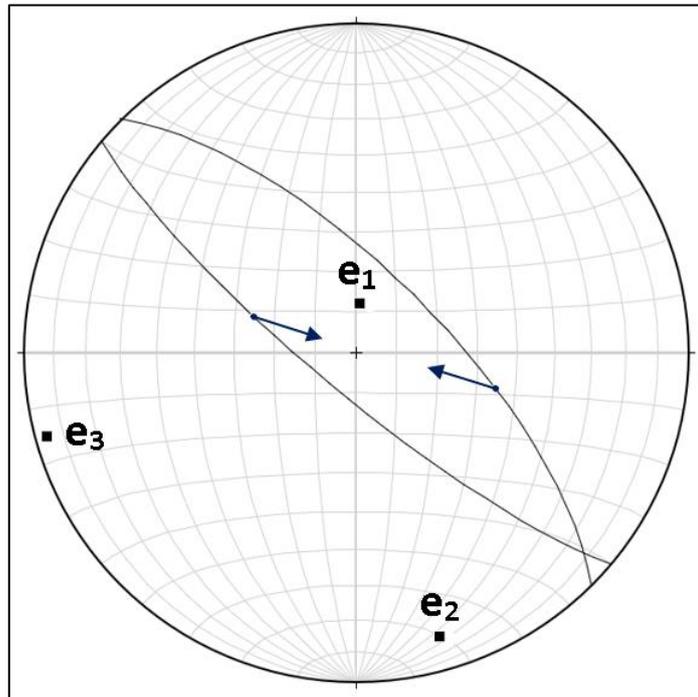


Figura 50. Red de Smith con la dirección de ejes principales de deformación de las fallas Inversa Sinistral de las estaciones F-05 y F-06.

Este cuadro muestra el resultado de analizar a la falla F-06 junto con la falla F-05; dicho análisis nos arroja los siguientes resultados:

Tabla 25. Ejes principales de deformación en las estaciones F-05 y F-06.

Ejes principales de deformación	Trend	Plunge
Eje mayor (e_1)	4	78
Eje intermedio (e_2)	164	11
Eje menor (e_3)	255	4

3.7.7. Estación F-07.

Esta estación se ubica en el flanco SW del anticlinal del Sector la Amistad, aquí se evidenció un set de cinco Fallas Normales las cuales poseen una dirección NE-SW, buzando al SE;

este set de fallas tiene la misma dirección de rumbo que el set de fallas descritas en la estación F-04. Estas fallas están las rocas calizas de la Formación Yumagual. En set de fallas tampoco se evidenció indicadores cinemáticos que ayuden con su interpretación; así que su análisis se basó en las relaciones estratigráficas de marcadores guía.

Tabla 26. Coordenadas y datos estructurales de las Fallas Normales de la estación F-07.

ESTACIÓN	COORDENADAS			DATUM DE FALLA				
	Longitud	Latitud	Altitud m.s.n.m.	Azimut	Dip	DD	Pitch	Cinemática
F-07	808370	9207023	3850	76	77	166	-	Normal
	809103	9206968	4068	60	78	150	-	Normal
	809569	9206909	4071	63	77	153	-	Normal
	809845	9206851	4075	75	74	165	-	Normal
	810117	9206743	4024	80	80	117	-	Normal



Foto 19. Fallas Normales de dirección NE-SW.

Longitud: 812809, Latitud: 9205343 y Altitud: 3953 m.s.n.m.

3.7.8. Estación F-08.

En esta estación se ha agrupado a cuatro fallas locales de rumbo sinistral; estas fueron con ayuda del análisis de imágenes satelitales con GE y fueron corroboradas en las salidas a campo. Estas fallas de rumbo son producto del movimiento de las regionales de la estación F-05 y F-06; a estas fallas también se las interpreta como un sistema de Riedel producto de dicho movimiento; que nos ayuda a la interpretación de la segunda componente cinemática.

Tabla 27. Coordenadas y datos estructurales de las Fallas Sinestrales de la estación F-08.

ESTACIÓN	COORDENADAS			DATUM DE FALLA				
	Longitud	Latitud	Altitud m.s.n.m.	Azimut	Dip	DD	Pitch	Cinemática
F-08	800983	9206487	4021	40	77	165	-	Sinistral
	811281	9206368	4003	30	78	150	-	Sinistral
	811644	9206341	4009	43	77	153	-	Sinistral
	811843	9206230	3992	40	74	165	-	Sinistral



Figura 51. Fallas de Rumbo Sinistral. Imagen extraída de SAS Planet, 2021.

3.7.9. Estación F-09.

Aquí se identificó a una falla al SE del área de estudio, en la Formación Yumagual; esta falla posee un azimut al NW, y está afectada por dos cinemáticas; una normal ya que, según el modelo de Anderson las fallas con buzamiento mayor a 45°, pertenecen a esa categoría; además sus planos de recristalización indican que también tuvo una cinemática inversa.

Tabla 28. Coordenadas y datos estructurales de la falla inversa de la estación F-09.

ESTACIÓN	COORDENADAS			DATUM DE FALLA				
	Longitud	Latitud	Altitud m.s.n.m.	Azimut	Dip	DD	Pitch	Cinemática
F-09	812944	9204013	4025	105	83	205	-	Inversa

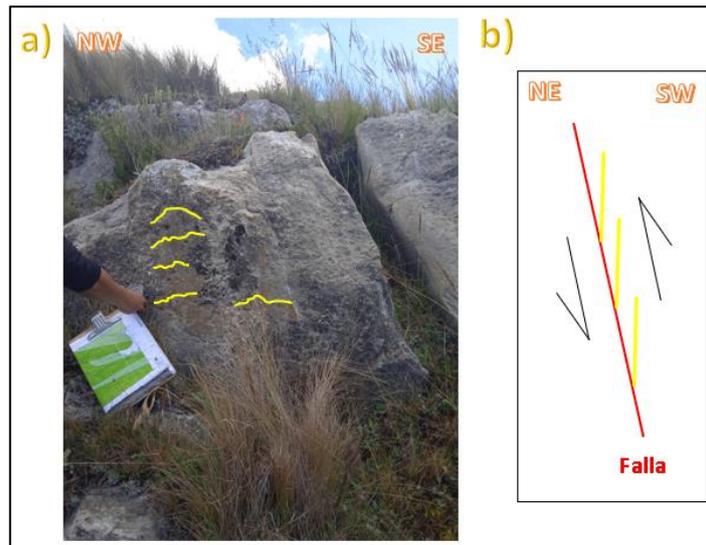


Foto 20. a) Recristalización de CaCO_3 . b) Interpretación cinemática del fallamiento inverso (Vista de perfil).

Longitud: 802940, Latitud: 9204010 y Altitud: 4024 m.s.n.m.

La recristalización de CaCO_3 y las fracturas extensionales en el plano de falla, nos dicen que el bloque techo ha subido, movimiento propio de las Fallas Inversas. En consecuencia, esta falla tuvo dos cinemáticas reconocibles al igual que las estaciones F-03, F-05 y F-06.

3.7.10. Estación F-10.

Falla que aflora en rocas calizas de la Formación Yumagual, su plano presenta estrías y planos de recristalización con calcita; al analizarlos estos se deduce que dicha falla posee una cinemática normal. Esta deformación posee un rumbo NW-SE y su buzamiento de 56° corrobora el fallamiento normal inferido por los planos de recristalización.

Tabla 29. Coordenadas y datos estructurales de la Falla Normal de la estación F-10.

ESTACIÓN	COORDENADAS			DATUM DE FALLA				
	Longitud	Latitud	Altitud m.s.n.m.	Azimut	Dip	DD	Pitch	Cinemática
F-10	813039	9205011	3986	139	56	249	79	Normal- sinestral

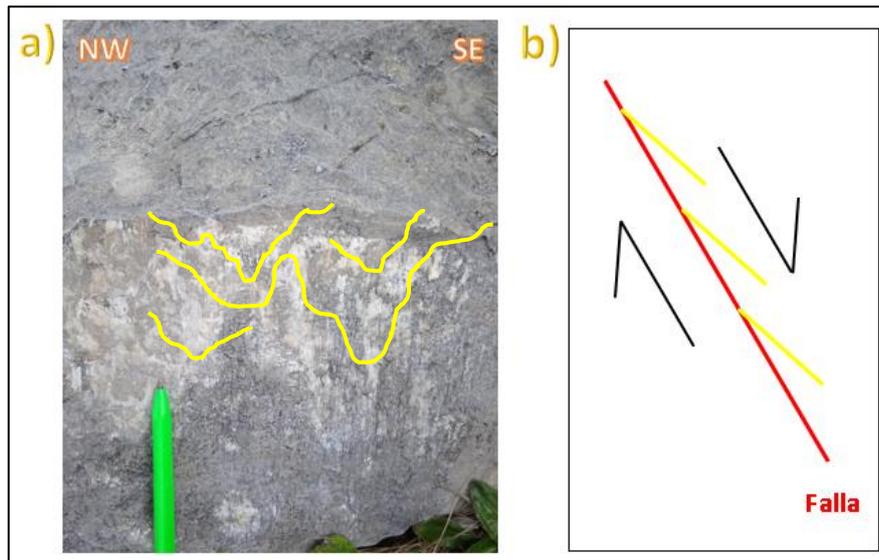


Foto 21. a) Plano de falla. b) Interpretación cinemática del fallamiento normal (vista de perfil).

Este: 812942, Norte: 9204217 y Altitud: 4036 m.s.n.m.

En la red de Smith se evidencia una extensión NW-SE, ya que esta es la dirección del eje principal mayor de deformación (e_1) y que en Fallas Normales nos señala la extensión; el eje menor de la deformación está al NE, mientras el eje principal de deformación intermedio se encuentra paralelo a la dirección del plano de falla.

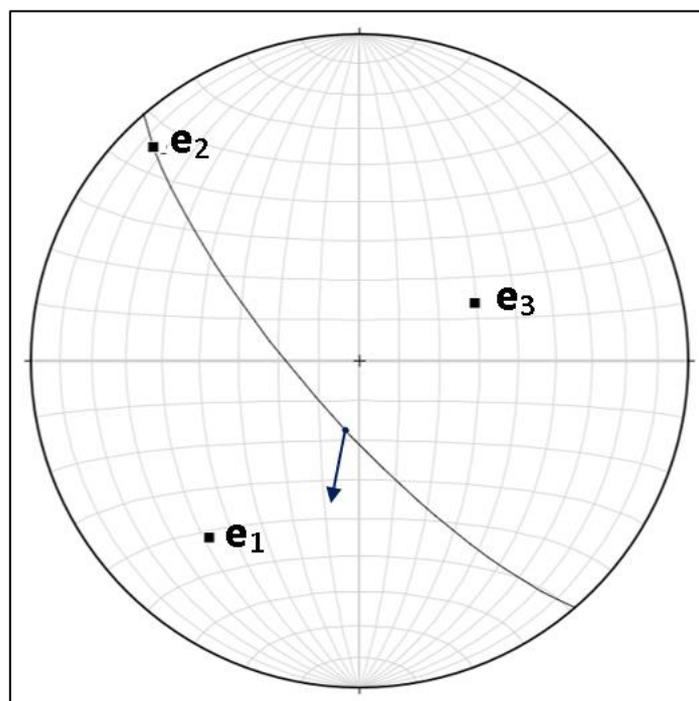


Figura 52. Red de Smith con la dirección de ejes principales de deformación de la Falla Normal con componente sinistral.

Tabla 30. Ejes principales de deformación la estación F-10.

Ejes principales de deformación	Trend	Plunge
Eje mayor (e_1)	220	30
Eje intermedio (e_2)	316	11
Eje menor (e_3)	64	58

3.7.11. Estación F-11.

Cerca de la falla de la estación F-06, se observa una Falla Inversa de dirección NE-SW, buzando hacia el SW, esta falla es de bajo ángulo y aflora en calizas de la Formación Cajamarca.

Tabla 31. Coordenadas y datos estructurales de la estación F-11.

ESTACIÓN	COORDENADAS			DATUM DE FALLA				
	Longitud	Latitud	Cota m.s.n.m.	Azimut	Dip	DD	Pitch	Cinemática
F-11	812964	9206065	3955	130	15	210	85	Inversa

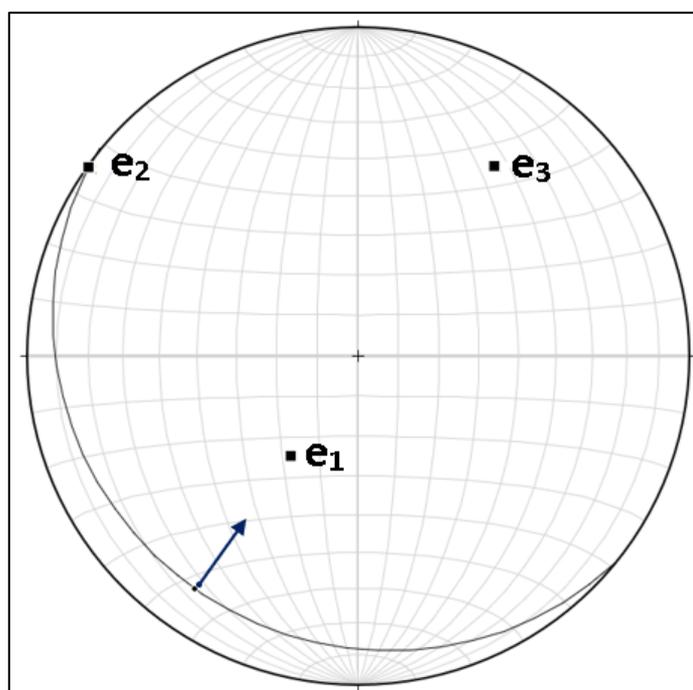


Figura 53. Red de Smith con la dirección de ejes principales de deformación de la Falla Inversa de la estación F-11.

Al colocar el datum de falla en la estereofalsilla (ver Figura 52), se observó que el eje principal mayor de deformación está en la parte superior de la falla y el eje menor de deformación en forma semihorizontal como lo muestran los resultados expuestos en la tabla 32. También se observó que esta falla posee una segunda componente dextral, la cual no es muy notoria.

Tabla 32. Ejes principales de deformación en la estación F-11.

Ejes principales de deformación	Trend	Plunge
Eje mayor (e_1)	213	60
Eje intermedio (e_2)	305	1
Eje menor (e_3)	36	30

3.7.12. Estación F-12.

Acercándose a la esquina SE del área de estudio, en la Formación Cajamarca, en el flanco SW del Sinclinal Volcado, ubicado en el centro poblado de Carbón Bajo; se evidenció a dos de Fallas Inversas con componente sinistral, la cual aflora en el corte de carretera de Carbón Bajo a Huanico. La primera falla es una Falla Inversa de bajo ángulo y la segunda es una Falla Inversa de alto ángulo; como ya se trató en estaciones anteriores, este tipo de fallas poseen dos cinemáticas; una normal, deducida por su elevado ángulo de buzamiento; y otra inversa, la cual se dedujo por sus planos de recristalización de calcita.

Tabla 33. Coordenadas y datos estructurales de las Fallas Inversa Sinistrales de la estación F-12.

ESTACIÓN	COORDENADAS			DATUM DE FALLA				
	Longitud	Latitud	Altitud m.s.n.m.	Azimut	Dip	DD	Pitch	Cinemática
F-12	813945	9204000	3835	170	25	257	70	Inversa- sinistral
	812942	9204217	4036	150	60	229	80	Inversa- sinistral

En el plano de esta falla se evidencia planos de recristalización con mineral calcita, los cuales poseen estrías y planos de recristalización de calcita que nos ayudan a determinar la cinemática de esta falla, la cual es inversa. Así mismo también se observa una segunda

componente en el movimiento inverso que es sinistral; y debido que el Pitch es mayor de 45°, prima el movimiento inverso, por lo que el movimiento es inverso sinistral.

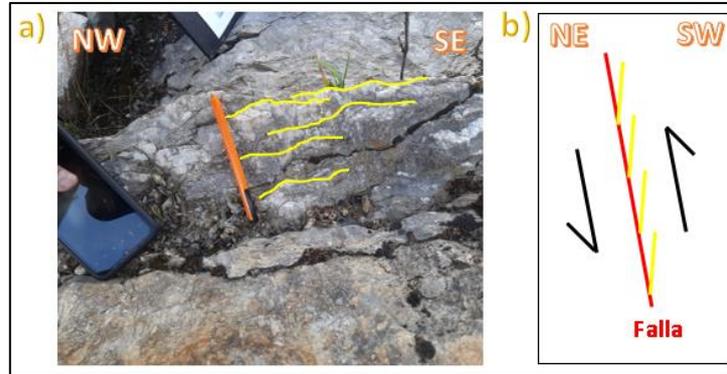


Foto 22. a) Falla inversa-sinistral. b) Interpretación cinemática del fallamiento inverso (vista de perfil).

Longitud: 813945, Latitud: 9204000 y Altitud: 3935 m.s.n.m.

Luego se colocó el datum de falla en una estereofalsilla y arrojó que el eje principal de formación menor tiene una dirección NE-SW y que este eje está en posición casi horizontal (plunge = 3°); también se puede observar que el eje de deformación máximo está al NW y posee un plunge de 72°, es decir el sistema sufrió una elevación hacia el NW.

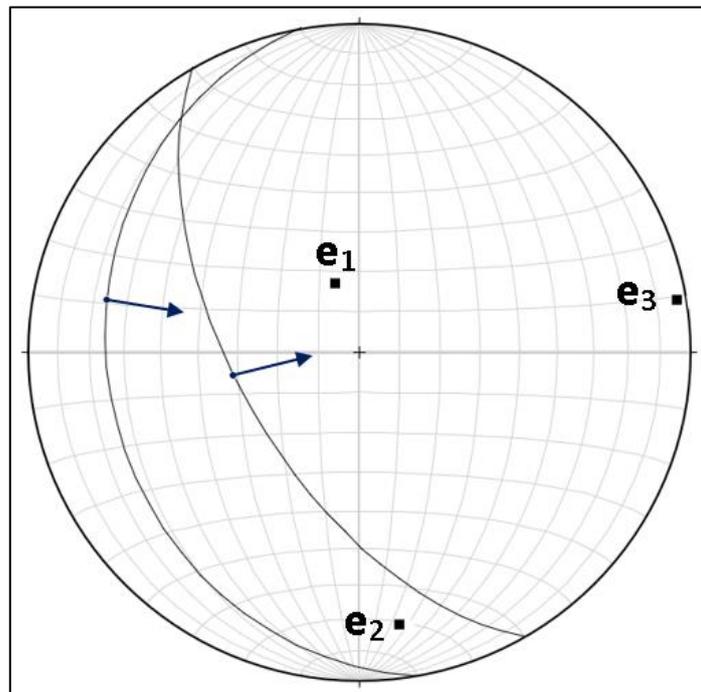


Figura 54. Red de Smith con la dirección de ejes principales de deformación de las Fallas Inversa-Sinistrales de la estación F-12.

Tabla 34. Ejes principales de deformación de las Fallas Inversa-Sinestrales de la estación F-12.

Ejes principales de deformación	Trend	Plunge
Eje mayor (e_1)	341	72
Eje intermedio (e_2)	172	18
Eje menor (e_3)	81	3

3.7.13. Estación F-13.

En el caserío de Carbón Alto, por el desvío hacia el Sector La Amistad, se evidenciaron dos fallas de dirección NW-SE; las cuales afloran en calizas de la Formación Yumagual, las dos fallas poseen estrías es planos de recristalización.

Tabla 35. Coordenadas y datos estructurales de las fallas de la estación F-13.

ESTACIÓN	COORDENADAS			DATUM DE FALLA				
	Longitud	Latitud	Altitud m.s.n.m.	Azimut	Dip	DD	Pitch	Cinemática
F-13	808856	9205296	3915	130	37	220	87	Inversa
	808873	9205309	4036	155	60	245	85	Normal

Los planos de recristalización de calcita, siguiendo los criterios de Doblas, nos ayuda a interpretar las cinemáticas de las fallas; las cuales se formaron en dos eventos tectónicos distintos. La primera es la Falla Inversa, producto una compresión de dirección NE-SW; la cual pertenece al primer evento el cual generó a los pliegues y a su vez lo podemos correlacionar con la Fase Tectónica Inca II. La segunda falla posee cinemática es normal; la cual se formó en el segundo evento tectónico reconocido en la zona, el cual es una extensión local NE-SW.

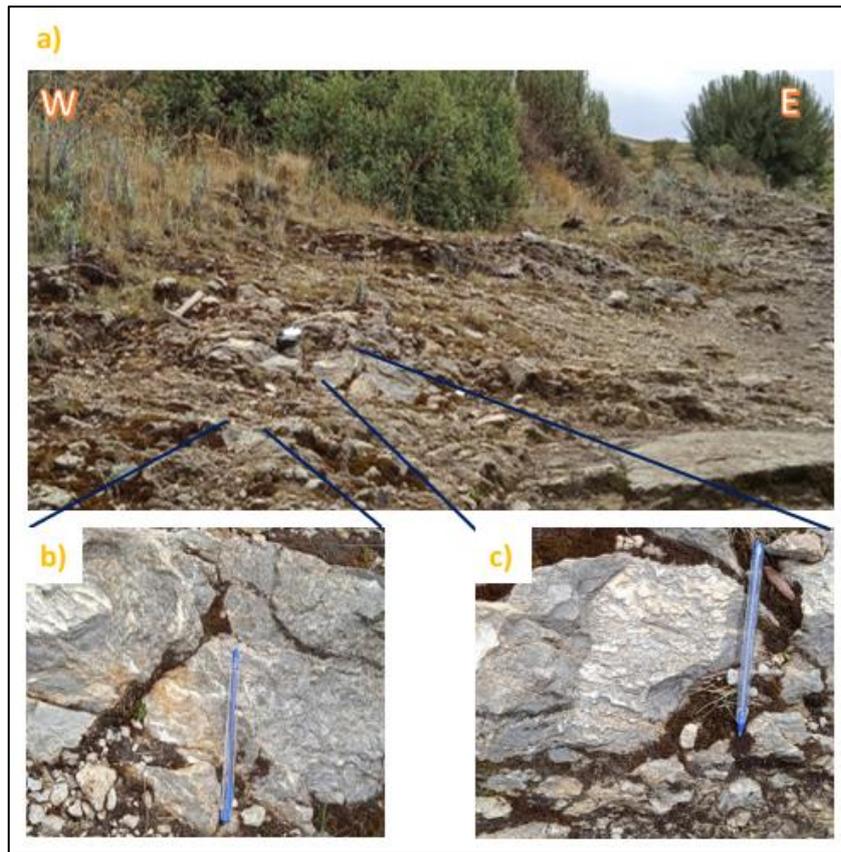


Foto 23. a) Fallas de la estación F-13. b) Falla Inversa. c) Falla Normal.

Longitud: 808880, Longitud: 9205301 y Altitud: 3935 m.s.n.m.

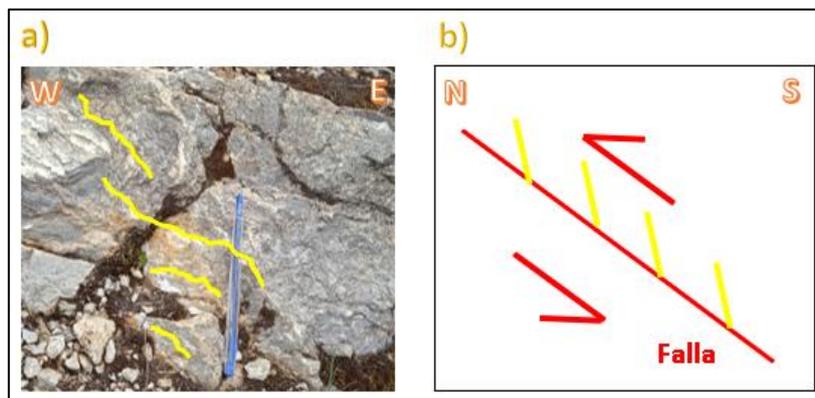


Foto 24. a) Plano de Falla Inversa con recristalización de CaCO_3 . b) Interpretación cinemática del fallamiento inverso (vista de perfil).

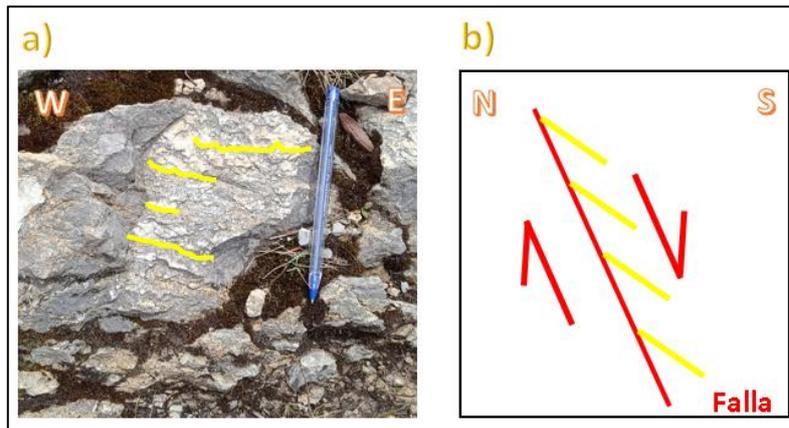


Foto 25. a) Plano de Falla Normal con recristalización de CaCO_3 . b) Interpretación cinemática del fallamiento normal (vista de perfil).

Extrapolando la información de campo a software Faulkin, observamos que la menor deformación se encuentra NE-SW con un plunge de 8° , decir casi horizontal y la mayor deformación está casi vertical al plano de falla (plunge de 82°); mientras que en el eje de deformación intermedio se encuentra casi paralelo al plano de falla, ya que posee un plunge de 2° . Hemos indica que la deformación en esta zona, experimentó una compresión y elevación del sistema hacia el SW.

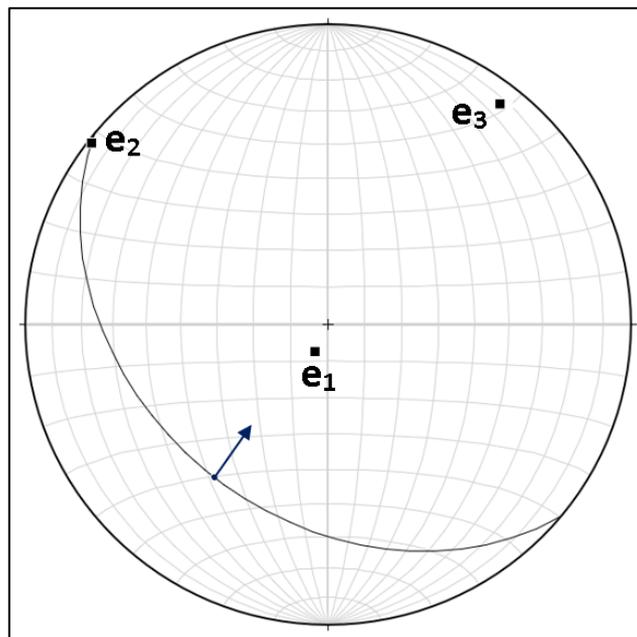


Figura 55. Red de Smith con la dirección de ejes principales de deformación de la Falla Inversa.

Tabla 36. Ejes principales de deformación de la Falla Inversa de la estación F-13.

Ejes principales de deformación	Trend	Plunge
Eje mayor (e_1)	205	82
Eje intermedio (e_2)	308	2
Eje menor (e_3)	38	8

De igual manera se procedió con la Falla Normal, la cual arrojó que el eje de deformación mayor posee una tendencia al SW-NE, con una inclinación de 24° desde la vertical; eje de deformación menor posee una dirección con tendencia al E-W, pero a diferencia de la anterior cinemática, aquí no esta casi horizontal, sino posee un plunge de 66° ; el eje de deformación intermedio se, la igual que en las estaciones anteriores, se encuentra paralelo al plano de falla.

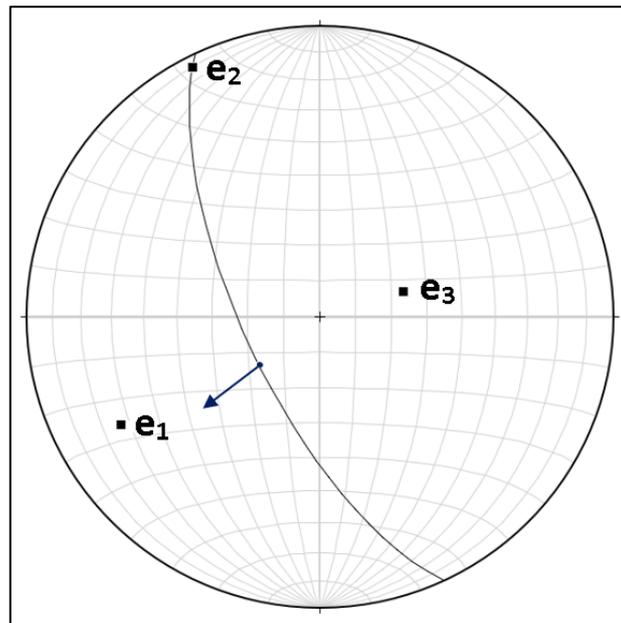


Figura 56. Red de Smith con la dirección de ejes principales de deformación de la Falla Normal.

Tabla 37. Ejes principales de deformación de la Falla Normal de la estación F-13.

Ejes principales de deformación	Trend	Plunge
Eje mayor (e_1)	241	15
Eje intermedio (e_2)	333	4
Eje menor (e_3)	78	75

3.8. PLIEGUES.

Se logró identificar pliegues de dirección NW-SE; estos son los de mayor tamaño cuya dirección coincide con la mayoría de estructuras; estos son: tres Sinclinales y dos Anticlinales; además de que esta dirección de deformación, sea a predominante ente las estructuras; esta es la dirección de la deformación andina en el Perú. También se distinguió a pliegues de dirección NE-SW, los cuales están de forma semi perpendicular a los pliegues principales; estos son dos Sinclinales y un Anticlinal. En este apartado se describirá y caracterizará.

3.8.1. Estación P-01.

En esta primera estación aflora un pliegue donde las rocas más jóvenes (Formación Celendín) se ubican en el centro de este, por lo que se lo clasifica como Pliegue Sinclinal; la dirección promedio de su eje es N310° y posee una vergencia hacia el noreste. En ambos flancos se observan foliaciones, cuyos rumbos de rumbo paralelo o casi paralelo a la dirección de los estratos. Las direcciones de los rumbos de los estratos del flanco NE, es un promedio de N130°, con un buzamiento que oscila entre 60° y 80° al SW; el otro flanco (flanco SW) posee un rumbo promedio de N320°, con buzamiento que oscila entre 75° y 89° al NE. Las estaciones estructurales se tomaron en cada flanco del sinclinal, en donde se tomaron data de los estratos.

Tabla 38. Datos estructurales promedio de los flancos del Sinclinal Volcado de la estación P-01.

Estación	Flanco	COORDENADAS			DATOS ESTRUCTURALES		
		Longitud	Latitud	Altitud m.s.n.m.	Azimut	Dip	DD
P-01	Noreste	812998	9209196	3792	305	83	35
	Suroeste	811535	9209449	3958	300	79	30

En el flanco SW del Pliegue Sinclinal, se observan estratos invertidos; estos estratos nos indican que ese pliegue surgió un volcamiento, haciendo que se cambie la inclinación de los estratos supere la vertical; es por esto que este pliegue es clasificado como un Pliegue Sinclinal Volcado. Al plotear sus los planos de los estratos en una estereofalsilla, se observa como los planos están orientados a un solo cuadrante, lo que ilustra mejor a un Pliegue Volcado.

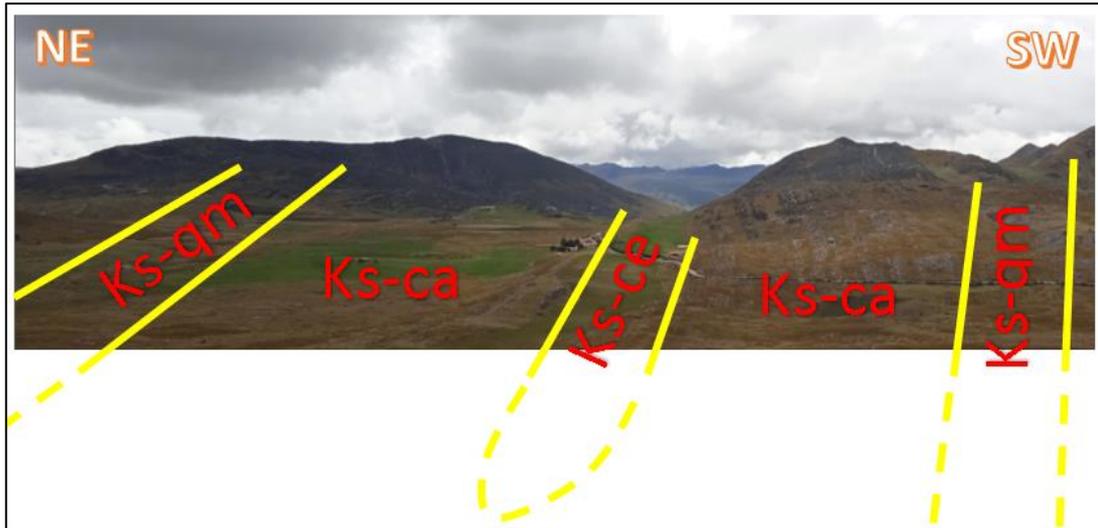


Foto 26. Sinclinal Volcado, cuyo núcleo es la Formación Celendín de la estación P-01.

Longitud: 810643, Latitud: 9210182 y Altitud: 3902 m.s.n.m.

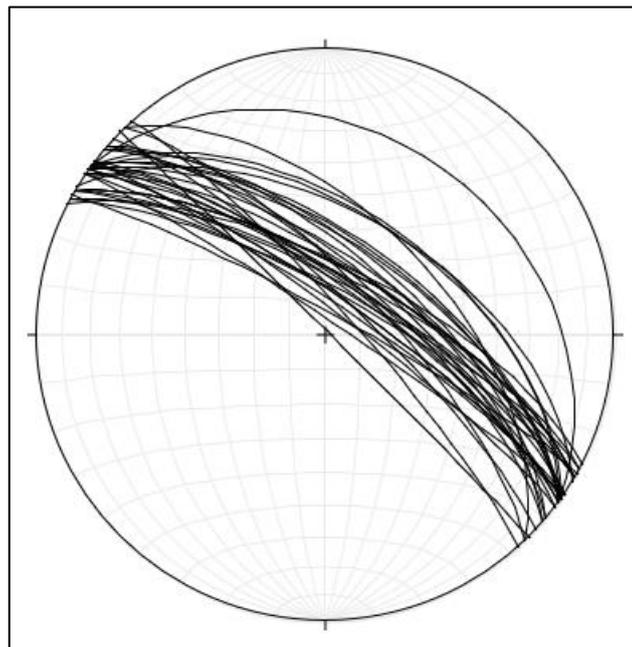


Figura 57. Estratos del Sinclinal Volcado de la estación P-01, ploteados en la Red de Wulff.

Ploteando los polos de los estratos en ambos flancos del Sinclinal; se observa que estos siguen una acumulación preferente en el cuadrante SW, esta acumulación tiene una tendencia a estar de forma semi paralela a la línea de eje del pliegue. Esto indica que el pliegue debe ser clasificado según la inclinación del eje del pliegue como un pliegue cilíndrico con una tendencia a ser no cilíndrico.

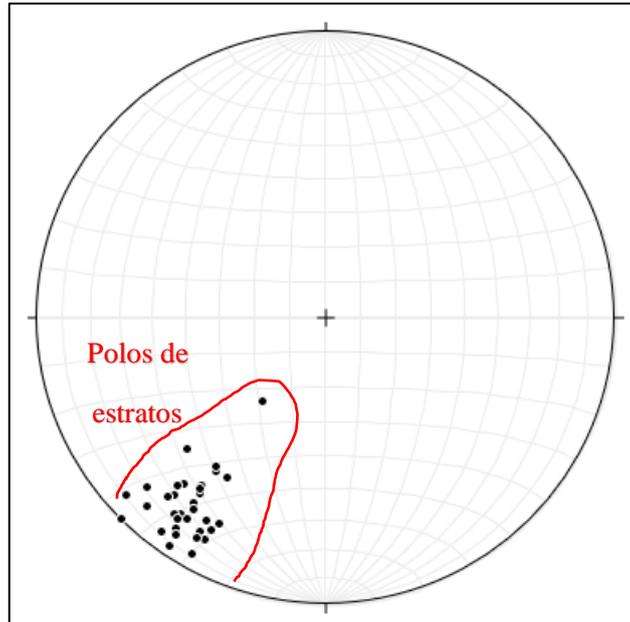


Figura 58. Polos de los estratos del Sinclinal Volcado de la estación P-01, ploteados en la Red de Wulff.

En la Figura 58, se observa que los polos no están perfectamente alineados en un círculo mayor; esto se debe a que el pliegue sufrió distintos eventos de deformación, los cuales deformaron al eje del pliegue. A continuación, se presenta la clasificación del pliegue de la estación P-02, atendiendo a los diversos criterios descritos en el marco teórico:

Tabla 39. Resumen de clasificación del pliegue de la estación P-01.

ESTACIÓN	CLASIFICACIÓN DE PLIEGUES SEGÚN		
	Su forma	Inclinación del plano axial	Inclinación del eje del pliegue
P-01	Pliegue Sinclinal	Pliegue Sinclinal Volcado	Pliegue Cilíndrico

3.8.2. Estación P-02.

Acercándonos a la falla de la estación F-05, evidenciamos los cambios de estratos que eran inversas a estratos normales; además se distinguió a la Formación Pariatambo, (Formación más antigua) en medio de la formación Yumagual (Formación más joven); por lo que, según la clasificación de pliegues atendiendo a su forma, es un Pliegue Anticlinal, donde las rocas más antiguas se localizan en el núcleo.

Tabla 40. Datos estructurales promedio de los flancos del Anticlinal Asimétrico de la estación P-02.

Estación	Flanco	COORDENADAS			DATOS ESTRUCTURALES		
		Longitud	Latitud	Altitud m.s.n.m.	Azimut	Dip	DD
P-02	Noreste	810670	9208762	3932	302	80	32
	Suroeste	810543	9208533	3941	115	65	205

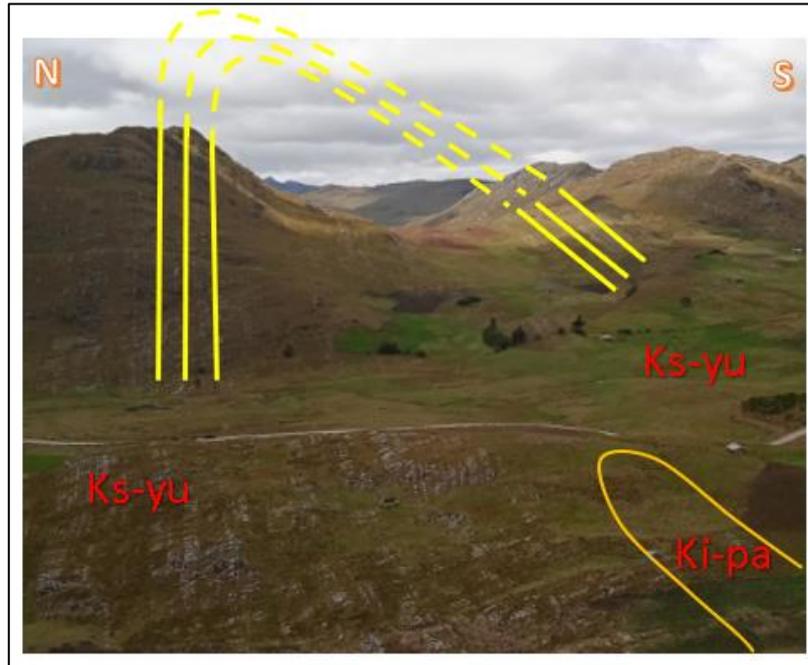


Foto 27. Anticlinal Asimétrico de la estación P-02.

Longitud: 809671, Latitud: 9209932 y Altitud: 4020 m.s.n.m.

Este Anticlinal posee un azimut de $N300^\circ$ y posee dos buzamientos distintos, lo que hace que el plano axial este inclinado, con una vergencia al NE y lo que hace que este pliegue sea clasificado como Pliegue Asimétrico. Al colocar los estratos en un diagrama β nos vemos como afianza dicha clasificación.

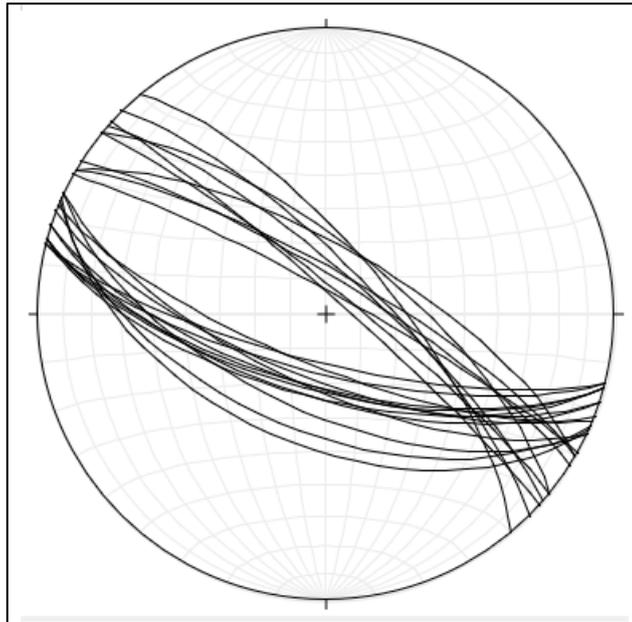


Figura 59. Estratos del anticlinal asimétrico en la estación P-02, ploteados en la Red de Wulff.

Al plotear los polos de cada estrato, se observa que estos siguen una tendencia paralela a al eje del pliegue, con poca dispersión, esto hace que sea clasificado como un pliegue cilíndrico. Al igual que el pliegue de la estación anterior, este pliegue cilíndrico tiene algunas desviaciones en el rumbo de los estratos, es decir no hay una clara tendencia de los paralelismos de estratos; de lo que se deduce que esto es por las diferentes etapas de deformación ocurridas en la zona.

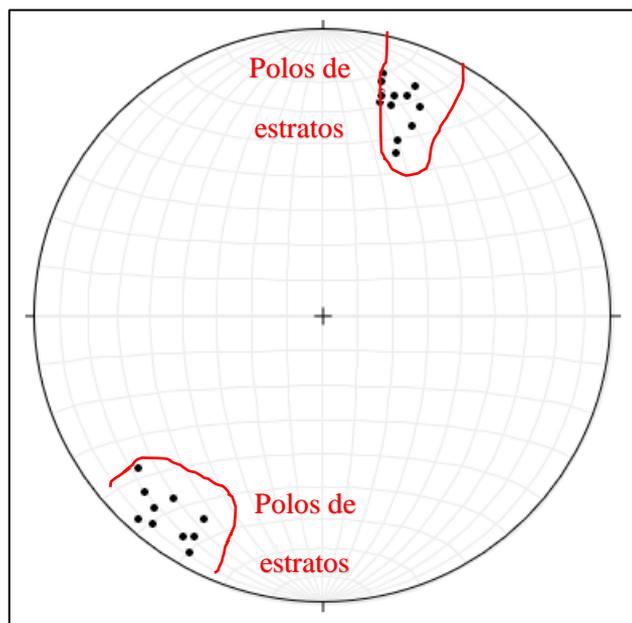


Figura 60. Polos de los estratos del Anticlinal Asimétrico de la estación P-02, ploteados en la Red de Wulff.

Tabla 41. Resumen de la clasificación del pliegue de la estación P-02.

ESTACIÓN	CLASIFICACIÓN DE PLIEGUES SEGÚN		
	Su forma	Inclinación del plano axial	Inclinación del eje del pliegue
P-02	Pliegue Anticlinal	Pliegue Anticlinal Asimétrico	Pliegue Cilíndrico

3.8.3. Estación P-03.

El pliegue de esta estación está ubicado en el sector La Amistad y se puede identificar fácilmente desde la carretera a Huanico; tiene un rumbo de N125° y una vergencia al NE. Este pliegue sinclinal asimétrico aflora en las rocas de la Formación Quilquiñan en el núcleo y seguido de rocas de la Formación Yumagual; lo que es, rocas jóvenes en el núcleo y por ende este pliegue es clasificado como Pliegue Sinclinal.

Tabla 42. Datos estructurales promedio de los flancos del Sinclinal Asimétrico de la estación P-03.

Estación	Flanco	COORDENADAS			DATOS ESTRUCTURALES		
		Longitud	Latitud	Altitud m.s.n.m.	Azimut	Dip	DD
P-03	Noreste	810151	9208400	3792	90	50	180
	Suroeste	809938	9208324	3996	350	30	80

En el cuadro anterior vemos que los buzamientos de sus flancos son distintos, por lo que la inclinación del plano axial, hace que este pliegue sea clasificado como Sinclinal Asimétrico, el cual tiene una vergencia al NE.

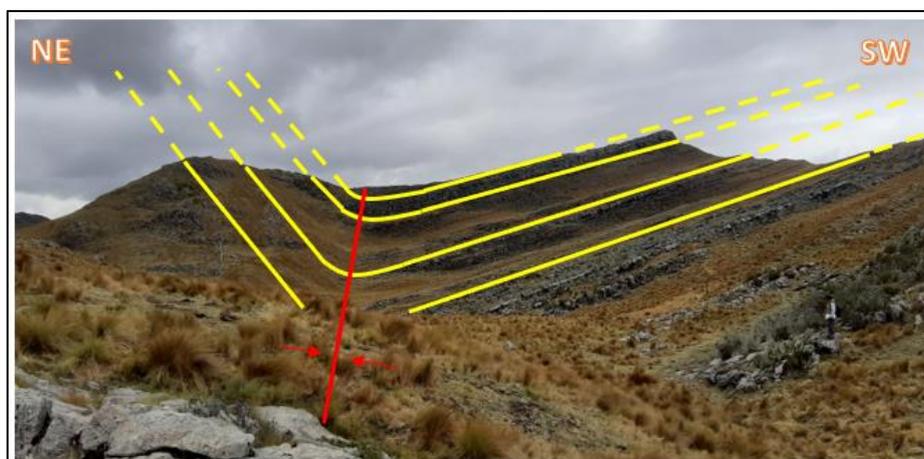


Foto 28. Sinclinal Asimétrico de la estación P-03.

Longitud: 809886, Latitud: 9208509 y Altitud: 3991 m.s.n.m.

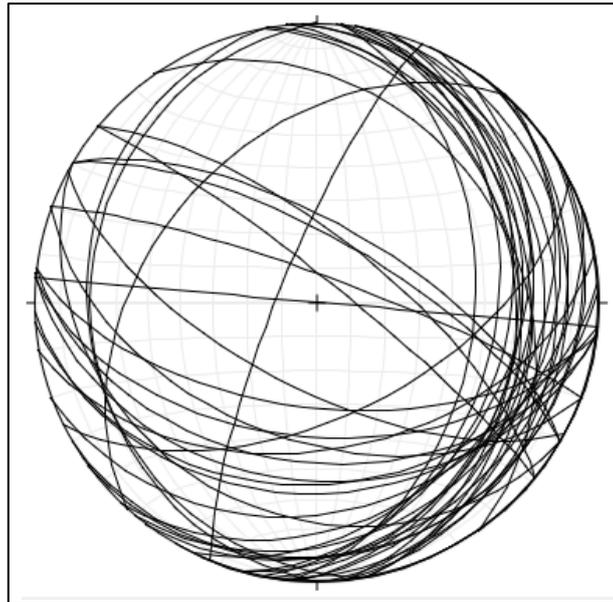


Figura 61. Estratos del Sinclinal Asimétrico de la estación P-03, ploteados en la Red de Wulff.

Para su cinemática, analizamos los datos extraídos en campo con ayuda del software stereonet; aquí por medio del Red de Smith y los diagramas π , se analizan los polos de planos de estratos. En dicho diagrama se puede observar que los polos están muy dispersos, no habiendo una tendencia clara, lo que nos arroja que estamos en un Pliegue no Cilíndrico.

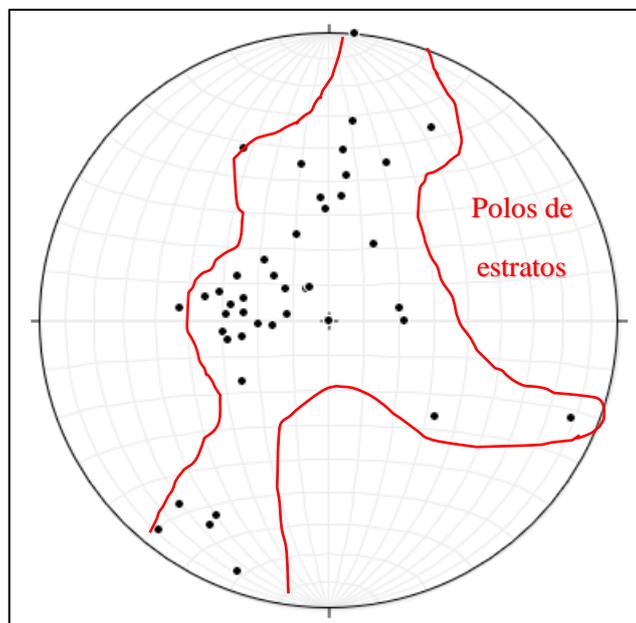


Figura 62. Polos de los estratos del Sinclinal Asimétrico de la estación P-03, ploteados en la Red de Wulff.

Tabla 43. Resumen de la clasificación del pliegue de la estación P-03.

ESTACIÓN	CLASIFICACIÓN DE PLIEGUES SEGÚN		
	Su forma	Inclinación del plano axial	Inclinación del eje del pliegue
P-03	Pliegue Sinclinal	Pliegue Sinclinal Asimétrico	Pliegue no Cilíndrico

3.8.4. Estación P-04.

En el sector La Amistad se localiza un pliegue, en cuyo centro están las rocas más antiguas, por lo que se clasifican como Pliegue Anticlinal; este pliegue posee una dirección de N120°. El flanco Noreste presenta dos pliegues menores y además están asociados a fallas normales, perpendiculares al eje. Los flancos presentan clivaje tectónico de dirección promedio de 130°.

Tabla 44. Datos estructurales promedio de los flancos del Anticlinal Asimétrico de la estación P-04.

Estación	Flanco	COORDENADAS			DATOS ESTRUCTURALES		
		Longitud	Latitud	Altitud m.s.n.m.	Azimut	Dip	DD
P-04	Noreste	809734	9207872	3902	340	30	70
	Suroeste	808670	9206699	4096	150	60	240

Este pliegue presenta un plano axial inclinado por lo que se lo clasifica como pliegue anticlinal asimétrico; esto se puede corroborar en los buzamineto de sus flancos, ya que estos son semejantes y además sus direcciones son opuestas.

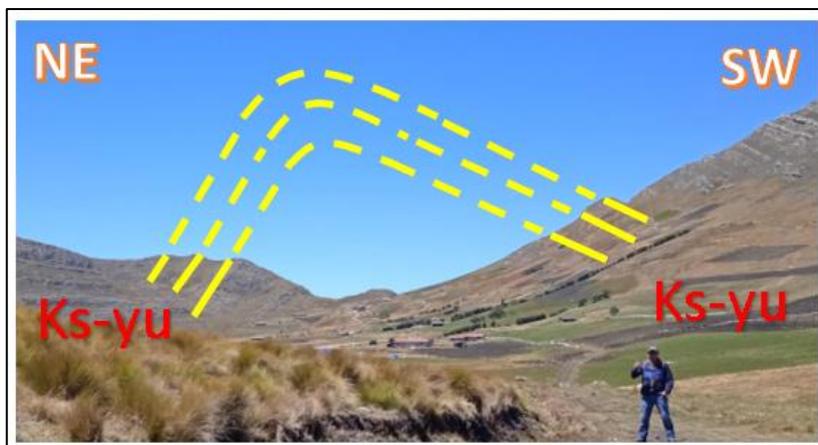


Foto 29. Anticlinal Asimétrico de la estación P-04.

Longitud: 810347, Latitud: 9207501 y Altitud: 4091 m.s.n.m.

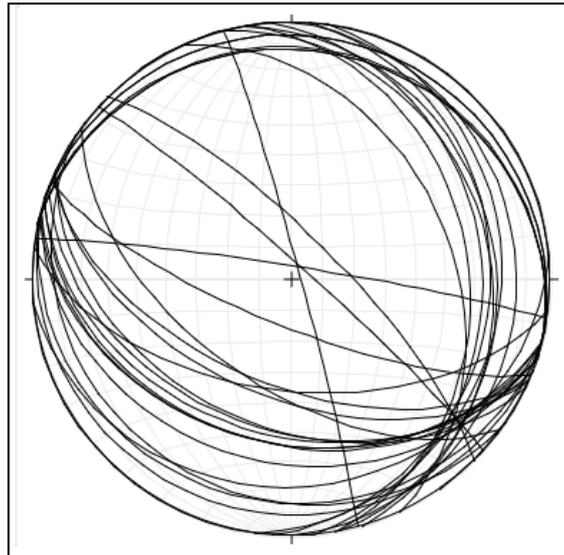


Figura 63. Estratos del Anticlinal Asimétrico de la estación P-04, ploteados en la Red de Wulff.

Ploteando los polos de los estratos, en la Red de Wulff; observamos que estos, al igual que el pliegue anterior, estos no tienen una tendencia clara para ir de forma paralela al eje del plegamiento; por lo que se clásica como pliegue no cilíndrico. Esta distribución de polos, se puede explicar que hubo más de un evento tectónico y esto se corrobora en campo donde se ve pliegues secundarios acompañado al flanco NE de este pliegue; además se encontraron varias Fallas Normales descritas en la estación F-04.

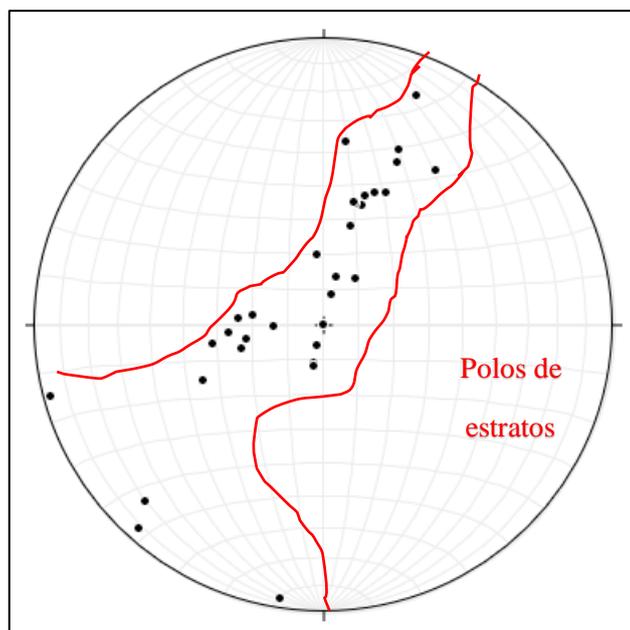


Figura 64. Polos de los estratos del Sinclinal Asimétrico de la estación P-04, ploteados en la Red de Wulff.

Tabla 45. Resumen de la clasificación del pliegue de la estación P-04.

ESTACIÓN	CLASIFICACIÓN DE PLIEGUES SEGÚN		
	Su forma	Inclinación del plano axial	Inclinación del eje del pliegue
P-04	Pliegue Anticlinal	Pliegue Anticlinal Asimétrico	Pliegue no Cilíndrico

3.8.5. Estación P-05.

En este pliegue las rocas más jóvenes pertenecientes en este caso a la Formación Cajamarca están en el núcleo, por lo que se lo clasifica como pliegue sinclinal. Este pliegue posee la misma vergencia al SW, los buzamientos de los estratos de cada flanco son diferentes y las direcciones de los estratos son opuestas, además el plano axial esta inclinado por lo que es un pliegue Sinclinal Asimétrico.

Tabla 46. Datos estructurales promedio de los flancos del Sinclinal Asimétrico de la estación P-05.

Estación	Flanco	COORDENADAS			DATOS ESTRUCTURALES		
		Longitud	Latitud	Altitud m.s.n.m.	Azimut	Dip	DD
P-06	Noreste	812982	9205066	3952	107	41	197
	Suroeste	812960	9204385	4025	300	73	60

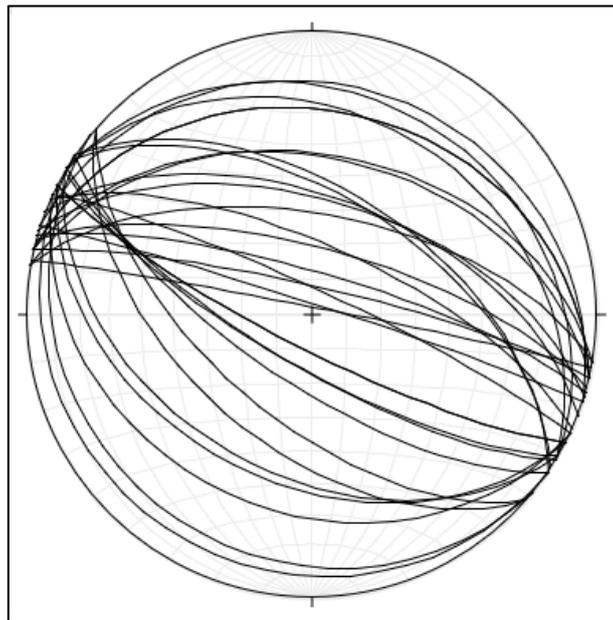


Figura 65. Estratos del Sinclinal Asimétrico de la estación P-05, ploteados en la Red de Wulff.

La proyección de sus polos hace se clasifique a este pliegue como pliegue cónico, ya que estos adoptan una tendencia a una línea, que sería el eje del pliegue; con la excepción de sus extremos que están un poco dispersos; esto se explica por las fallas encontrado en sus extremos.

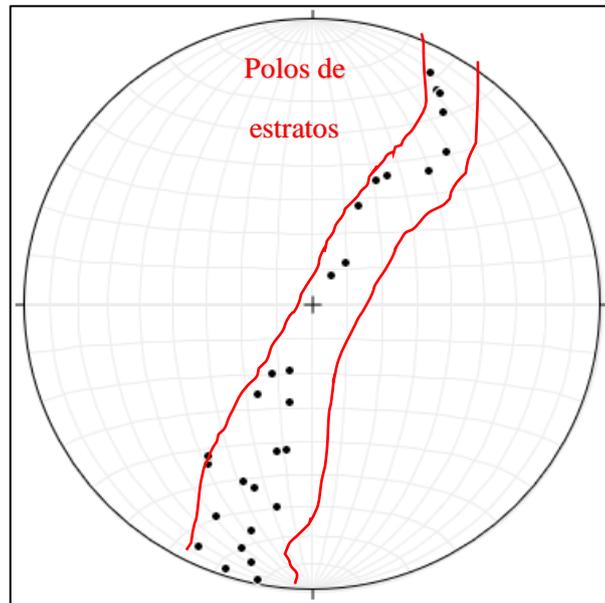


Figura 66. Polos de los estratos del Sinclinal Asimétrico de la estación P-05, ploteados en la Red de Wulff.

Tabla 47. Resumen de la clasificación del pliegue de la estación P-05.

ESTACIÓN	CLASIFICACIÓN DE PLIEGUES SEGÚN		
	Su forma	Inclinación del plano axial	Inclinación del eje del pliegue
P-05	Pliegue Sinclinal	Pliegue Sinclinal Asimétrico	Pliegue Cilíndrico

3.8.6. Estación P-06.

En el sector de carbón alto aflora un pliegue; en el cual las rocas jóvenes, que en este caso están representadas por rocas de la Formación Cajamarca, están en el núcleo, por lo que se lo clasifica como Pliegue Sinclinal. Este pliegue tiene una vergencia opuesta a los pliegues anteriores, es decir con en dirección SW.

Tabla 48. Datos estructurales promedio de los flancos del Sinclinal Volcado de la estación P-06.

Estación	Flanco	COORDENADAS			DATOS ESTRUCTURALES		
		Longitud	Latitud	Altitud m.s.n.m.	Azimut	Dip	DD
P-06	Noreste	808300	9208629	3973	120	55	210
	Suroeste	808402	9205833	3956	114	45	204

Este sinclinal posee capas invertidas, estas capas en el flanco NE de dicho pliegue; además posee sus flancos con igual dirección; de esto se deduce que se trata de un Sinclinal Volcado. Al plotear los datos de los estratos en una estereofalsilla, observamos como sus planos están en un mismo cuadrante (ver figura 67), lo que corrobora su clasificación.

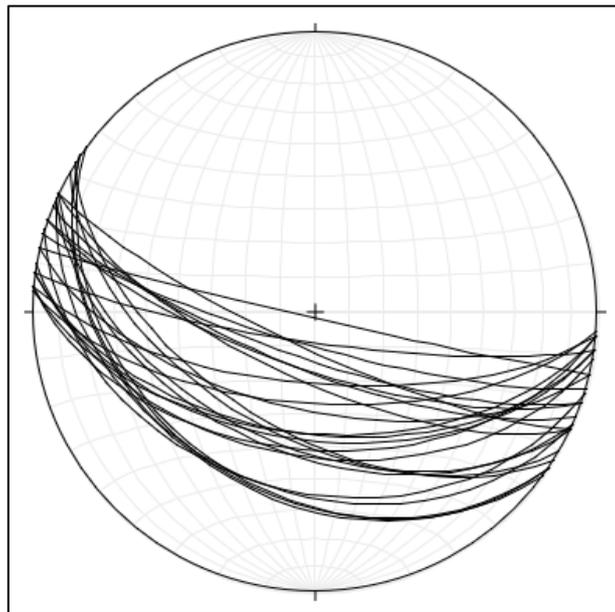


Figura 67. Estratos del Sinclinal Volcado de la estación P-06, ploteados en la Red de Wulff.

Al proyectar sus polos se observa que estos tienden a agruparse en una misma línea por lo que se lo clasifica como pliegues cilíndricos; la tendencia de esta agrupación no está del todo bien definida; esto nos indica que, si bien es un pliegue cilíndrico, este ha sufrido más de un evento deformacional y esto se ha venido corroborando en todo este estudio.

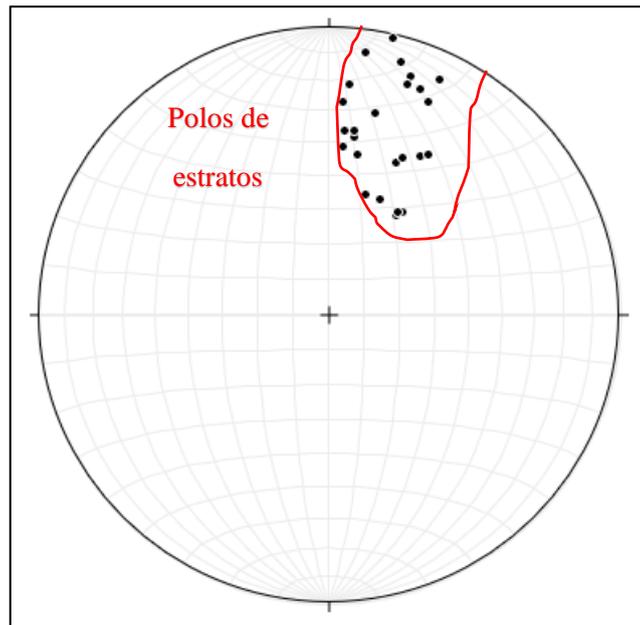


Figura 68. Polos de los estratos del Sinclinal Asimétrico de la estación P-06, ploteados en la Red de Wulff.

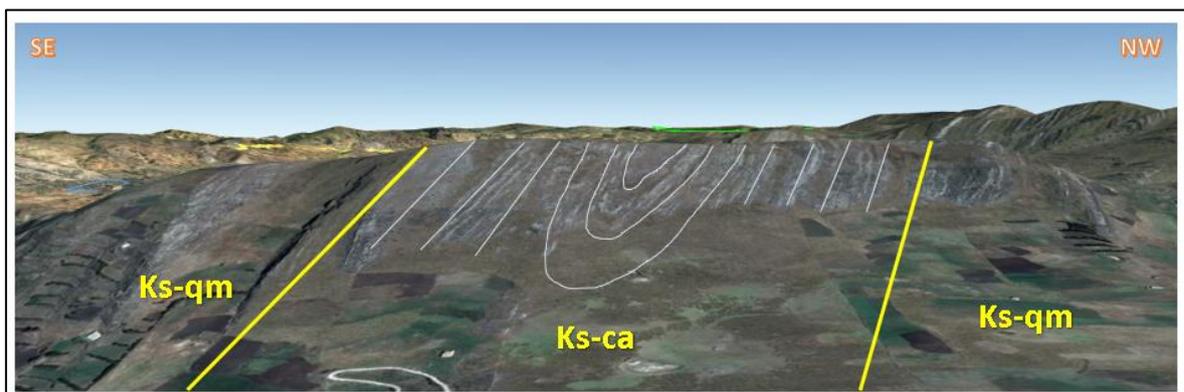


Figura 69. Sinclinal Volcado en cuyo núcleo aflora la Formación Cajamarca. Imagen extraída de Google Earth, 2021.

Tabla 49. Resumen de la clasificación del pliegue de la estación P-06.

ESTACIÓN	CLASIFICACIÓN DE PLIEGUES SEGÚN		
	Su forma	Inclinación del plano axial	Inclinación del eje del pliegue
P-06	Pliegue Sinclinal	Pliegue Sinclinal Volcado	Pliegue Cilíndrico

3.9. INDICADORES CINEMÁTICOS

Gran parte de los indicadores cinemáticos se utilizaron para determinar la cinemática de las fallas, y entre ellos tenemos a planos de recristalización, estrías de falla, fracturas tensionales en planos de falla y foliaciones tectónicas. En este apartado se tratará a los indicadores cinemáticos que no se han expuesto en los apartados anteriores.

3.9.1. Fracturas extensionales en echelón.

En el sector La Amistad flanco NE del anticlinal de la estación P-04 y en el flanco SW del sinclinal de la estación P-03; se observaron fracturas extensionales en Echelón de dirección promedio N230° y buzamiento de 80° al NW, estas aparecen en rocas calizas de la Formación Yumagual y de la Formación Quilquiñán Mujarrúm y están rellenas de calcita, las cuales presentan una coloración anaranjada en superficie debido a la oxidación. Estas fracturas se asocian con el modo I de fracturamiento de la roca.

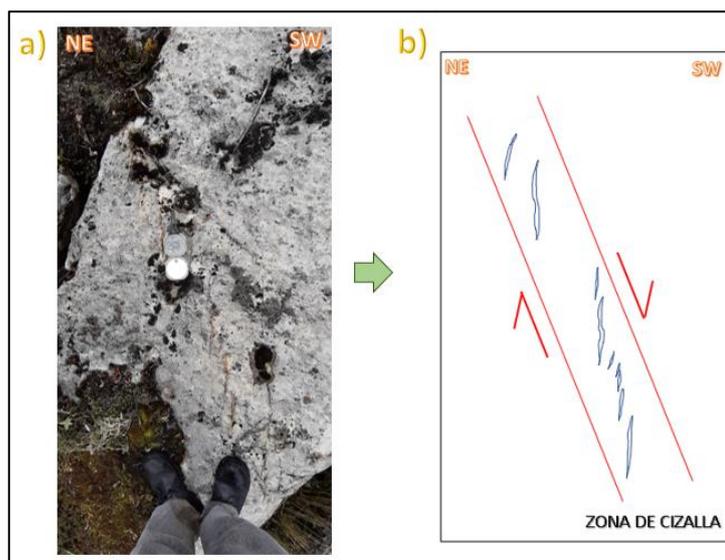


Foto 30. a) Fracturas extensionales en echelón, rellenas de calcita. b) Interpretación cinemática del cizallamiento.

Longitud: 809932, Latitud: 9208309 y Altitud: 4002 m.s.n.m.

Estas fracturas indican deformación por cizalla (ver foto 30), la cual posee una dirección promedio N225°; esta zona de cizalla, se formó en un medio semi frágil, ya que las fracturas son rectas y sus terminaciones no tienen curvaturas. Estas zonas de cizalla se observaron en pequeñas dimensiones de 50 a 100 centímetros, pero están bien distribuidas a lo largo todo

el flanco NE del Anticlinal de la estación P-04 y del flanco SW del Sinclinal de la estación P-03. Las zonas de cizalla fueron generadas durante el movimiento de fallas de desgarre regionales, expuestas en las estaciones F-05 y F-06; esto a su vez provocó movimientos extensionales de dirección NW-SE y compresionales de dirección NE-SW.

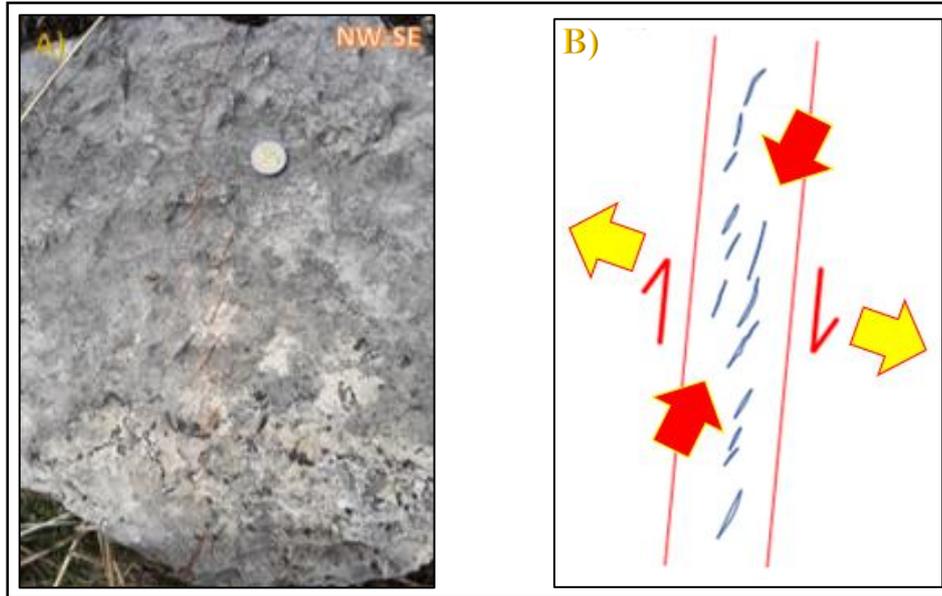


Figura 70. A) Fracturas extensionales en echelón, rellenas de calcita. B) Cinemática de la zona de cizalla; extensión (fechas amarillas) y compresión (fechas rojas).

3.9.2. Fracturas extensionales.

Se identificaron fracturas extensionales, en diferentes partes; estas fracturas están rellenas de calcita y afloran en las Formaciones calcáreas desde la Formación Chúlec hasta la Formación Cajamarca. Las fracturas extensionales poseen dirección NW-SE y NE-SW; de esto se deduce que hubo extensiones en las direcciones NE-SW y NW-SE, respectivamente.

También se identificó a fracturas extensionales perpendiculares a la estratificación; estas son de rumbo N120° y sus buzamientos son cercanos a cero; estas fracturas afloraron entre las dos fallas de rumbo, cortando a la estratificación; también afloraron en planos de falla, al norte y sur de la zona de estudio, sirviendo estos para ayudar a determinar la cinemática de las fallas.

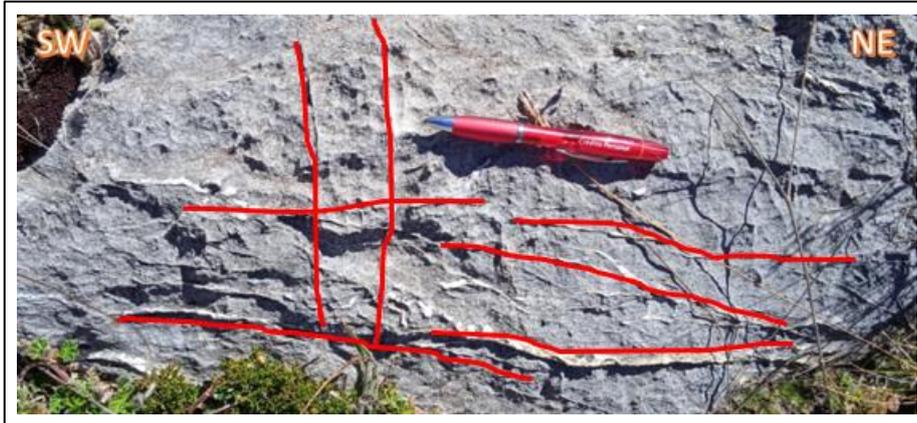


Foto 31. Fracturas extensionales rellenas de mineral de calcita (CaCO_3).

Longitud: 812927, Latitud: 9204124 y Altitud: 4040 m.s.n.m.

3.9.3. Clivaje tectónico.

En ambos flancos de los pliegues, se evidencian zonas de clivaje tectónico asociado su plegamiento, ya que está orientado paralelamente a la superficie axial de los pliegues. Esta laminación secundaria se formó perpendicular al acortamiento de la corteza terrestre y al esfuerzo principal mayor σ_1 , los cuales estarían orientados NE-SW; coincidiendo con la dirección de la tectónica andina.



Foto 32. Clivaje tectónico en calizas de la Formación Cajamarca.

Longitud: 813892, Latitud: 9209008 y Altitud: 3793 m.s.n.m.

Debido a que el clivaje se puede observar a simple vista, este clivaje se clasifica como un Clivaje Disyuntivo; y debido que sus planos con superficies regulares, este clivaje pertenece al subgrupo de Clivaje por Crenulación. El clivaje se presentó a escala de planos como a escala de granos.

CAPÍTULO IV.

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1. ANÁLISIS DE LINEAMIENTOS.

Para este análisis se unió toda la información extraída de las imágenes Landsat 8; observándose que algunos lineamientos se repiten y otros sufren pequeñas desviaciones a lo largo de su trayectoria. A los primeros se les suprimió los más pequeños y a los segundos se les corrigió dichas desviaciones. También se superpuso la con una imagen satelital en color verdadero, observándose que algunos lineamientos son carreteras, caminos y cercos, los cuales fueron depurados.

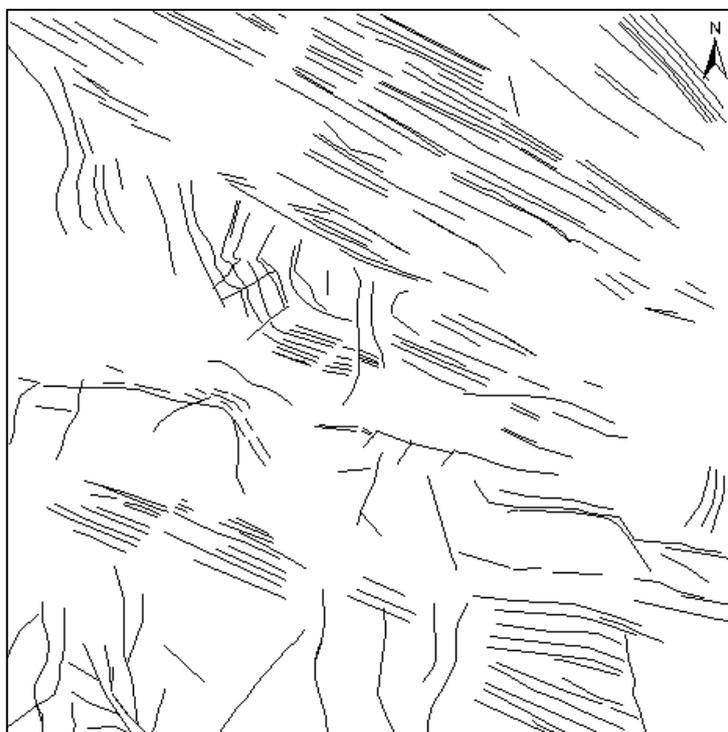


Figura 71. Lineamientos totales unidos y corregidos.

En la Figura 71; se observa que existe una predominancia de lineamientos con tendencia NW-SE, ubicándose su mayor concentración al norte del área de estudio. Esta tendencia coincide con la dirección de los ejes de los pliegues, fallas y estratos reconocidos anteriormente; por lo que se infiere que son estructuras tectónicas. Algunos lineamientos verticales, de tendencia N-S, son Fallas Normales identificadas en campo o son el resultado de la erosión fluvial, la cual ha dejado pequeñas quebradas o cárcavas; estos lineamientos se

encuentran en su mayoría al suroeste de la imagen en donde exponen patrones clásicos de drenaje. Los lineamientos con tendencia E-W, aparecen en el centro de la imagen son estratos o clivaje. Los lineamientos de forma ovalada son zonas periféricas de los pliegues.

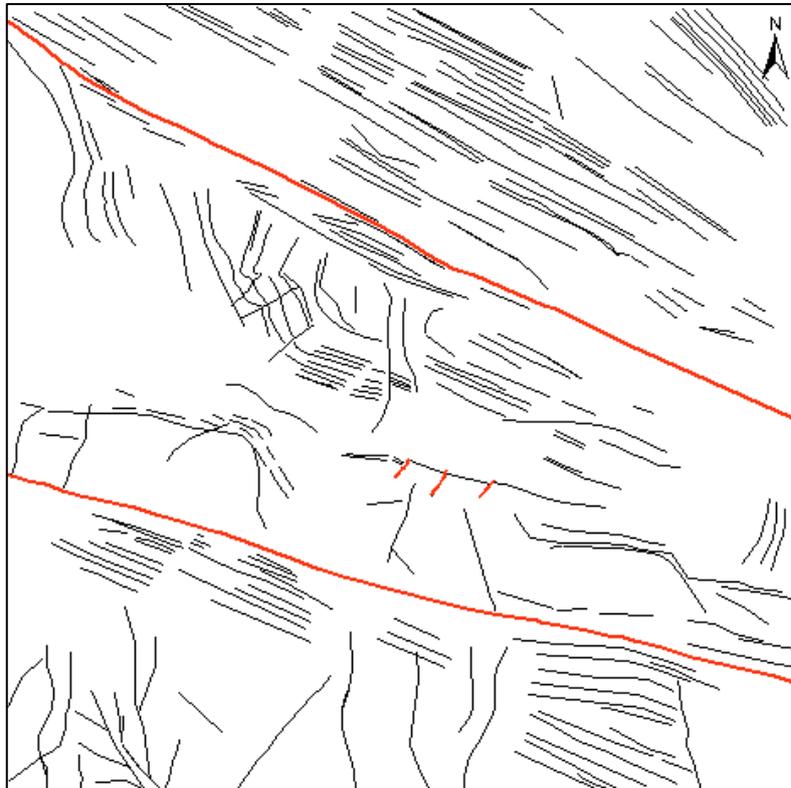


Figura 72. Delimitación de fallas por agrupación de lineamientos.

En la Figura 72 se observa una marcada zonificación de tres zonas o lo en adelante llamaremos dominios estructurales. El dominio NE, exhibe lineamientos con orientación NW-SE; que son fallas, pliegues, estratos y clivaje; y nos indican una dirección preferencial de la deformación, la cual coincide con la dirección de la deformación andina. El segundo dominio corresponde al centro de la imagen, en donde se observa que disminuye la tendencia NW-SE y empiezan a aparecer algunos lineamientos con tendencia E-W y N-S. En el último dominio estructural, reaparece los lineamientos NW-SE y siguen los N-S; los lineamientos N-S son quebradas que exhiben un patrón dendrítico. Los límites de los dominios estructurales son las Fallas Inversa-Sinistral regionales, por lo que la zona está muy influenciada estructuralmente por este par de fallas. Los límites tres dominios estructurales, coincide con ubicación de las Fallas Inversa-Sinistrales de las estaciones F-05 y F-06; esto nos hace inducir que dichas fallas tienen mucha importancia en la evolución del sistema; siendo el domino central la parte donde más ha influido.

4.2. ANÁLISIS CINEMÁTICO DE LA DEFORMACIÓN FRÁGIL.

4.2.1. Análisis de fallas.

4.2.1.1. Análisis de las estaciones de fallas.

En la estación F-01, se identificó a un par de fallas de cinemática normal; estas fallas se forman en ambientes extensionales; que en este caso tuvo una dirección NE-SW que, al no tener estrías de fallas, esta se dedujo perpendicular al plano de falla; dicha extensión fue un evento de escala local como resultado del relajamiento de esfuerzos después del Primer Evento Tectónico, por lo que esta extensión se consideró como un Segundo Evento Tectónico. Esa misma dirección, en la estación F-02, se distinguió un evento tectónico, el cual fue compresional ocasionando una cinemática inversa; al ser producido por un solo evento tectónico, tener cinemática inversa y poseer el mismo azimut que los pliegues, a esta falla se la correlaciona con los eventos que produjeron el plegamiento.

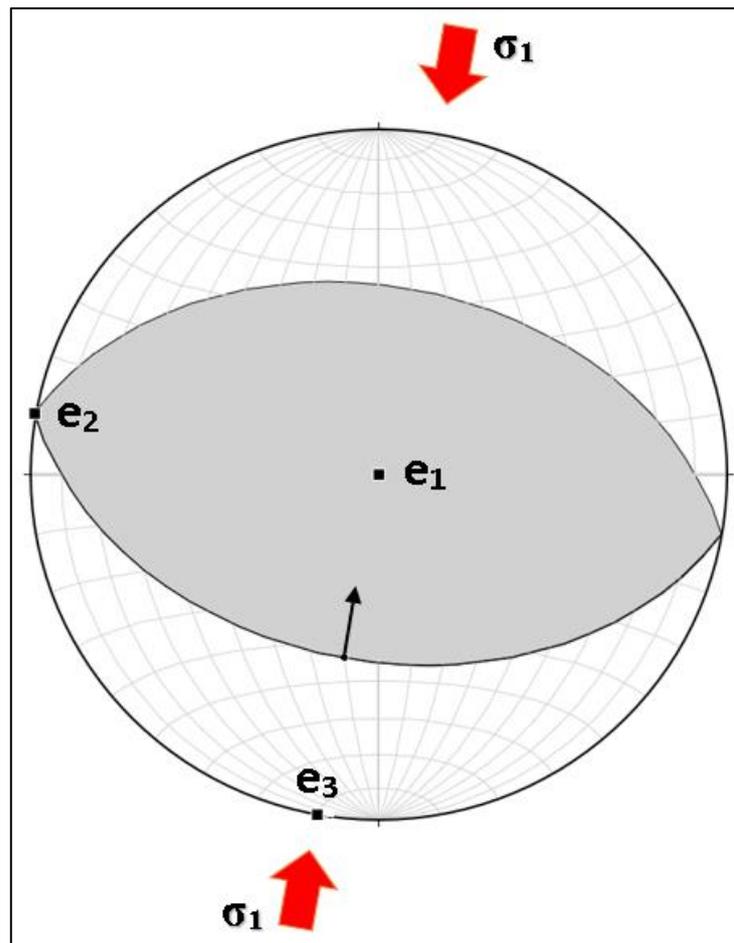


Figura 73. Análisis de la compresión de la estación F-02, por el método de los Diedros Rectos.

Las fallas de la estación F-03, evidencia una extensión en dirección NE-SW, la cual generó la cinemática normal y luego una compresión en la misma dirección que generó la cinemática inversa, en los planos de las fallas normales previos; es por eso que tenemos a fallas inversas de alto ángulo. El análisis de las fallas en la estación F-03 se realizó por el método de los Diedros Rectos, en cual arroja direcciones de los ejes principales de deformación del último evento deformacional, evidenciado por las estrías de falla, de dichos ejes se extrae información sobre los esfuerzos; donde el esfuerzo mayor (σ_1) posee un azimut de N236°, tal como se aprecia en la figura 74. Esta dirección del esfuerzo principal es la dirección de la compresión principal y se correlaciona con la Fase Inca II y pertenece al Tercer Evento Tectónico reconocido en la zona.

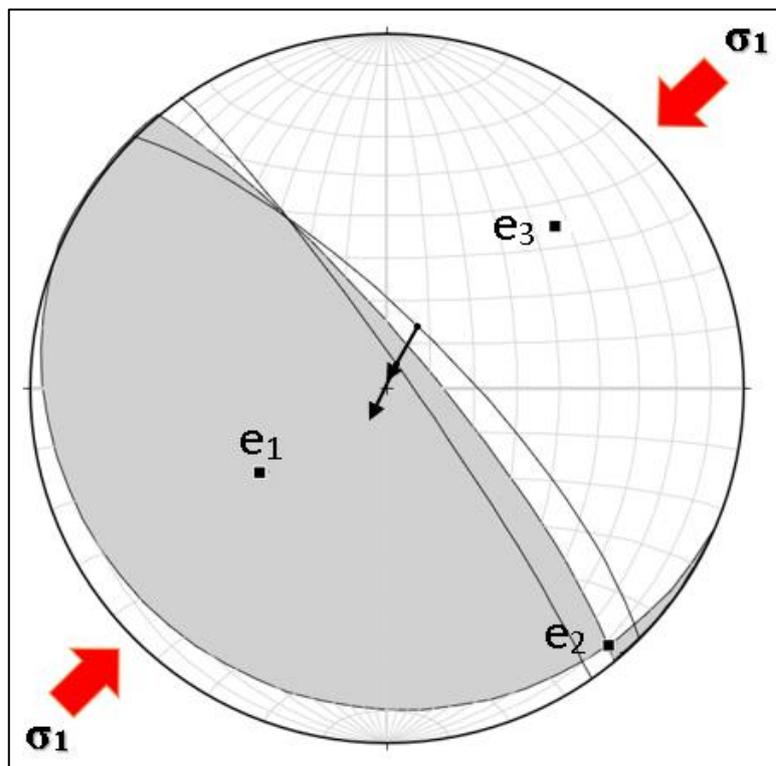


Figura 74. Análisis de la compresión de la estación F-03, por el método de los Diedros Rectos.

Los eventos de deformación por extensión y compresión descritos líneas arriba, afectaron también a las fallas regionales descritas en la F-05 y F-06, formándolas en un primer momento como Fallas Normales; con planos de falla de 70° y 80° respectivamente. A su vez esta extensión generó fracturas extensionales, de dirección NW-SE, a lo largo de toda el área de estudio. Luego como ya se mencionó ocurrió eventos compresivos que reactivaron a estas fallas normales, dándoles una cinemática inversa-sinistral, ambas con una componente inversa; este evento creó entre las fallas, un ambiente de transpresión que dio origen a

estructuras compresionales, extensionales y de cizalla; expuestas en las estaciones F-04, F-07 y F-08. Además, por la dirección del esfuerzo principales mayor (ver figura 75) se las correlaciona con la Fase Inca III y corresponde al cuarto y último evento tectónico identificado.

Los sets de fallas de las estaciones F-04 y F-07, de cinemática normal, se crean a partir de extensiones locales producto de las compresiones del tercer y cuarto evento tectónico, así las fallas locales de Rumbo Sinistral de la estación F-08, nacen como producto la cizalla que producen dichas fallas regionales al deformarse y que a su vez surgen como producto de una compresión de dirección NE-SW.

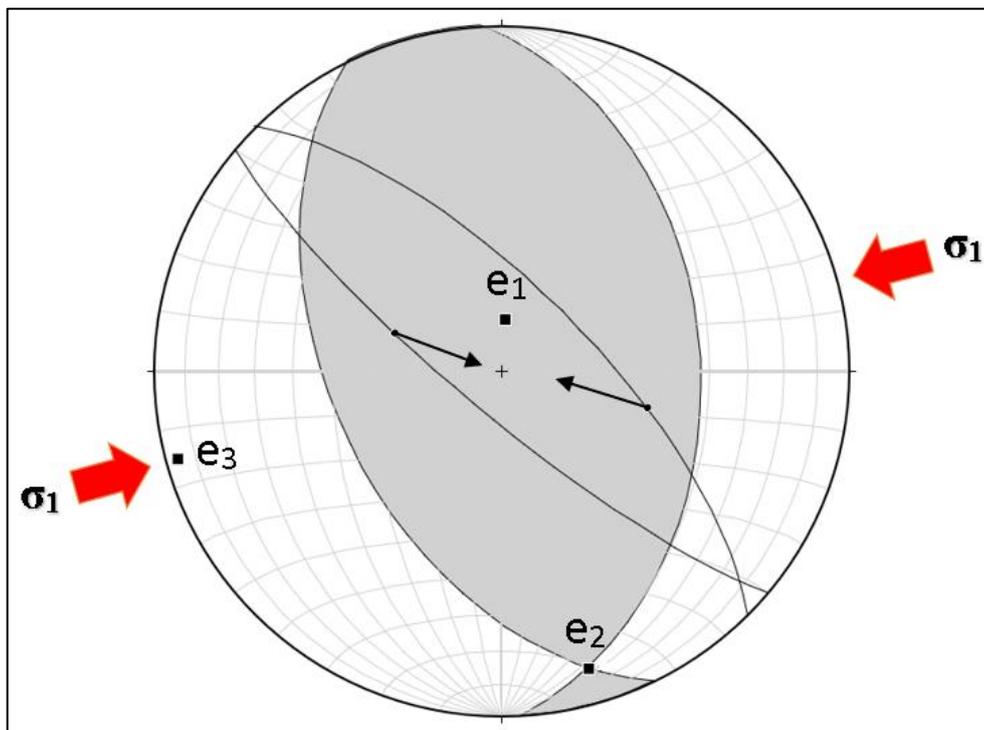


Figura 75. Análisis de compresión de las estaciones F-05 y F-06, por el método de los Diedros Rectos.

En la figura 76 vemos que las fallas de las estaciones F-05 y F-06, generaron dos direcciones preferentes de deformación; una en dirección NW-SE, que generó estructuras de extensión como Fallas Normales; y la otra en dirección NE-SW, que generó estructuras de compresión como Fallas Inversas. Este movimiento también produjo zonas de cizalla (ver fracturas en echelón) y zonas de fallas de rumbo, descritas en la estación F-08 las cuales actúan como Riedel.

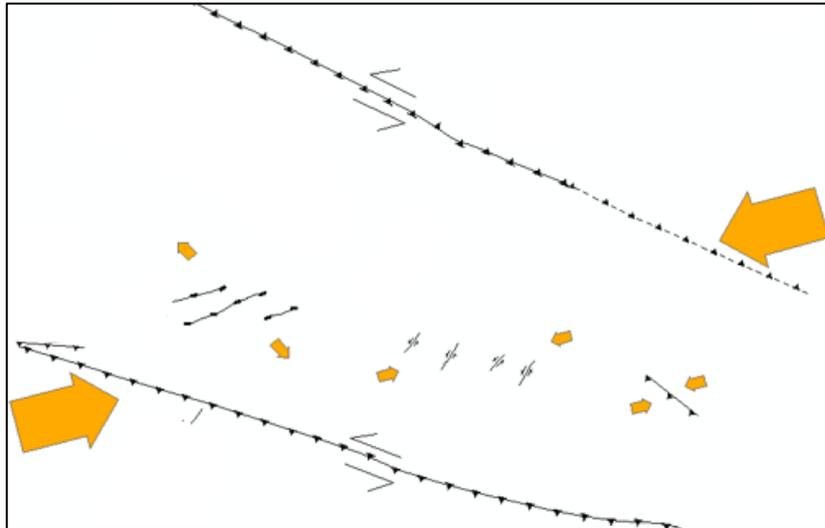


Figura 76. Estructuras resultantes del movimiento de las fallas F-05 y F-06.

La estación F-09, es una muestra la misma reactivación de Fallas Normales a Fallas Inversas, que hemos visto a lo largo de este análisis. La falla de esta estación, aflora en la parte SE del área de estudio; y complementa junto con las fallas del norte; ese movimiento compresional que reactiva fallas; se la correlaciona con el Tercer evento tectónico, perteneciente a la Fase Inca II. La estación F-10, muestra un fallamiento normal, dicha falla posee una dirección similar a las de fallas de la estación F-01, de que se deduce que surgieron para el mismo evento tectónico, el cual es extensional en una dirección NE-SW.

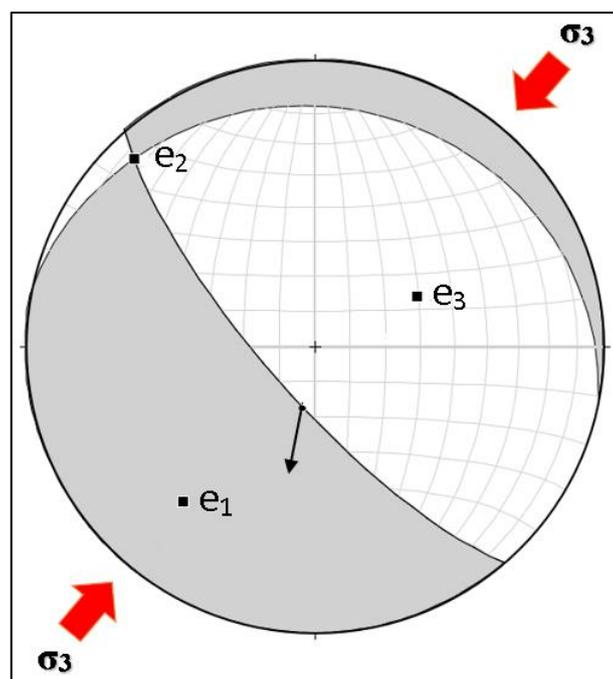


Figura 77. Análisis de la extensión de la estación F-10, por el método de los Diedros Rectos.

En esta estación si se pudo analizar su cinemática por el método de los diedros rectos; el cual arroja que dicha falla tuvo una extensión NE-SW, formando estructuras de dirección NW-SE.

La Falla Inversa con una ligera componente dextral de la estación F-11, muestra un solo movimiento por lo que se formó para un solo evento, el cual fue una compresión en dirección NE-SW (ver figura 78); para ello se trató la data de esta estación y se analizó por el método de diedros rectos. A esta falla la podemos relacionada espacial y temporalmente con los plegamientos, ya que están relativamente cercanos, poseen una dirección similar y al ser Fallas Inversas, surgieron de una compresión. A diferencia de las Fallas Inversas de otras estaciones, estas no tuvieron dos cinemáticas, porque solo fueron formadas por un evento compresional; el mismo que es dirección diferente a la compresión del Tercer Evento Tectónico reconocido en esta tesis; por estas razones se lo definió como el Primer Evento Tectónico.

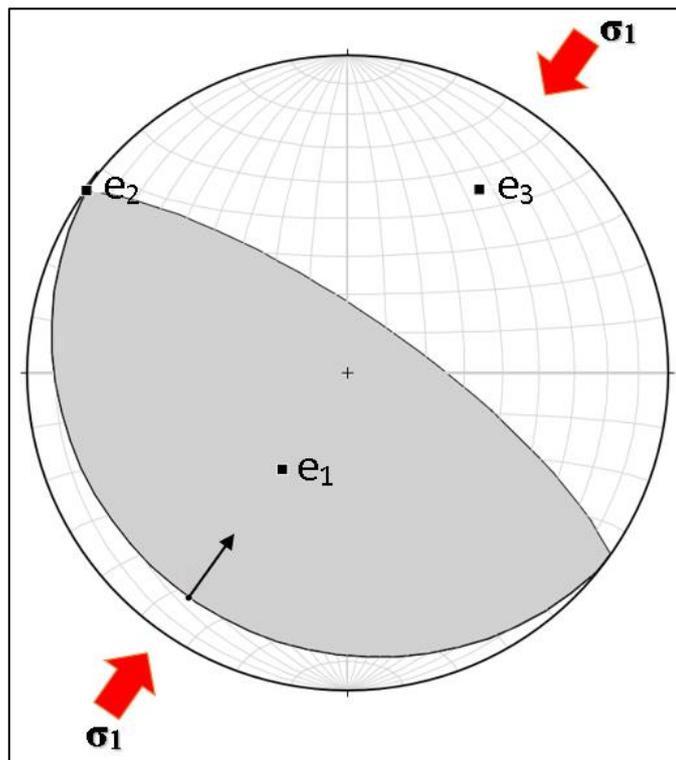


Figura 78. Análisis de la compresión en la estación F-11, por el método de los Diedros rectos.

En la estación F-12, existen dos fallas inversas con una componente sinistral; la primera es una falla de alto ángulo tiene dos cinemáticas, una normal y otra inversa; la cinemática normal posee una dirección NW-SE y se generó por una extensión en dirección NE-SW

perteneciente al Segundo Evento Tectónico identificado en esta tesis; la segunda cinemática es inversa-sinistral producido una elevación de las formaciones y una compresión NE-SW; dirección que coincide con la subducción de placas y se la puede correlacionar con la Fase Inca III. Así mismo la otra falla de esta estación (Falla Inversa de bajo ángulo) se la correlaciona con este último evento; que al analizarlas en conjunto y por separado, la posición de los esfuerzos también coincide con la Fase Tectónica Inca III.

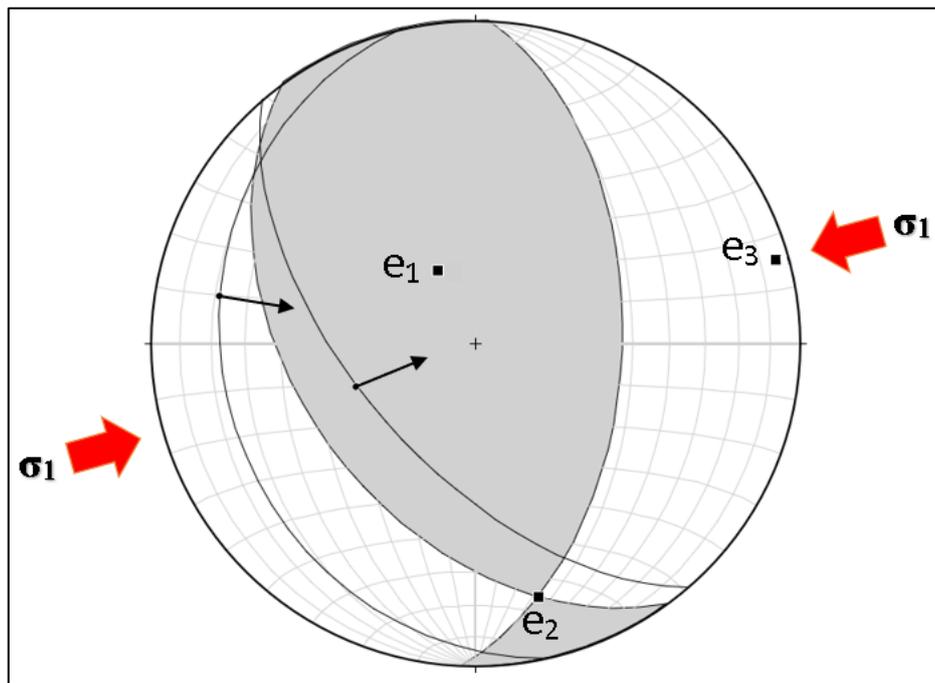


Figura 79. Análisis de la compresión en la estación F-12, por el método de los Diedros Rectos.

En la Falla Inversa de la estación F-13, las rocas sufrieron una deformación por compresión en la dirección NE-SW, generando la deformación que eleva el sistema y crea estructuras de dirección NW-SE; esta falla presenta un solo movimiento y está relacionada con las fallas de la estación F-03; formándose en el Primer Evento Tectónico definido en el área de investigación; el cual se correlaciona con la Fase Inca I.

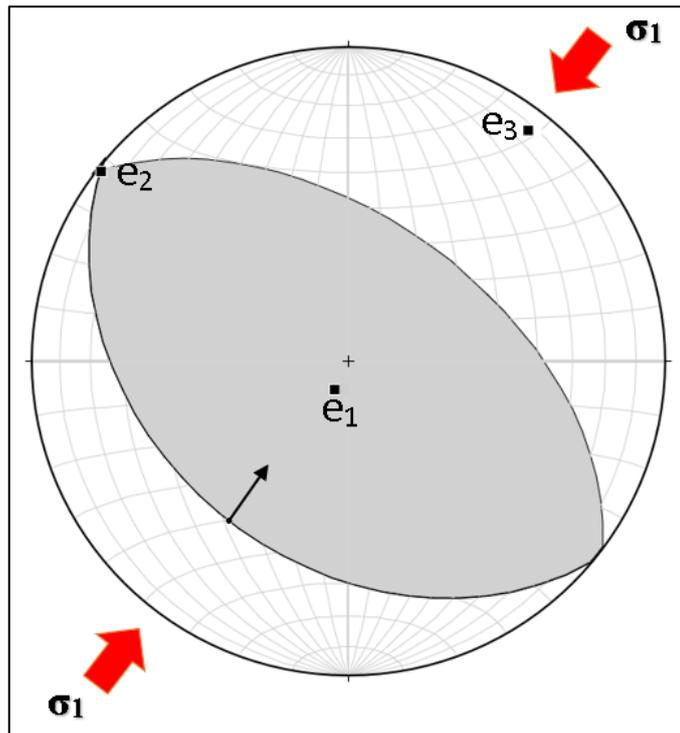


Figura 80. Análisis de la compresión de la Falla Inversa de la estación F-13, por el método de los Diedros Rectos.

En la estación 13 se evidenció dos fallas con cinemáticas distintas; en la primera de ellas, es normal de dirección NW-SE, formada por la extensión local NE-SW, perteneciente al Segundo Evento Tectónico reconocido en la zona.

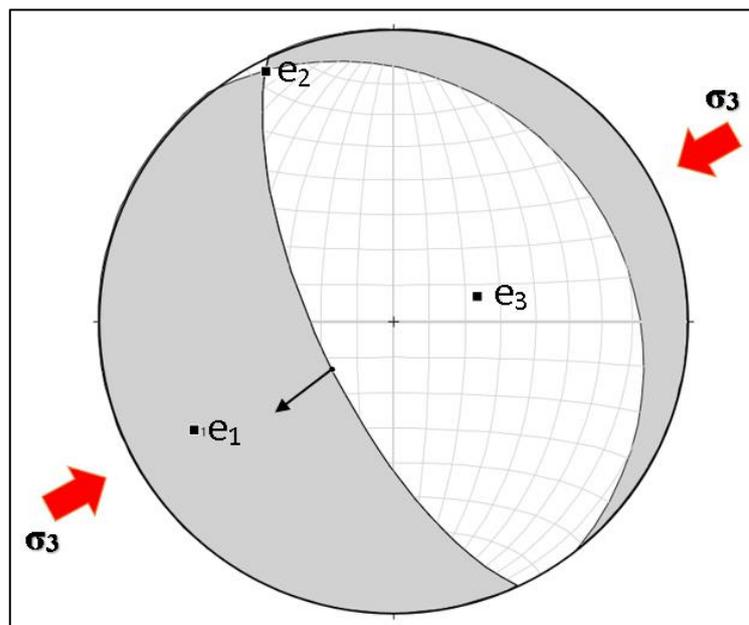


Figura 81. Análisis de la extensión en la falla normal de la estación F-13, por el método de los Diedros Rectos.

4.2.1.2. Análisis poblacional de fallas.

Finalmente se realizó un análisis poblacional de todas las fallas cuya cinemática pertenezca a un solo evento tectónico. Para el Primer Evento Tectónico se agrupó a las fallas que solo tuvieron solo cinemática inversa y que sus azimuts tengan la misma tendencia, es decir las fallas de las estaciones F-02, F-11 y la Falla Inversa de la estación F-13; aplicando el Método de los Diedros Rectos, se observa que hay una compresión NE-SW y una elevación hacia el SW (ver figura 82); siendo esta la deformación principal de dicho evento y la deformación menor está en la misma dirección de los esfuerzos principales mayores (σ_1). A dicho evento se lo clasificó en esta tesis como el primer evento tectónico y se correlaciona con la Fase Tectónica Inca I, ya que la dirección de la compresión coincide con la que ocurrió en dicha fase tectónica; así misma compresión NE-SW es la responsable de la formación de los pliegues NE-SW.

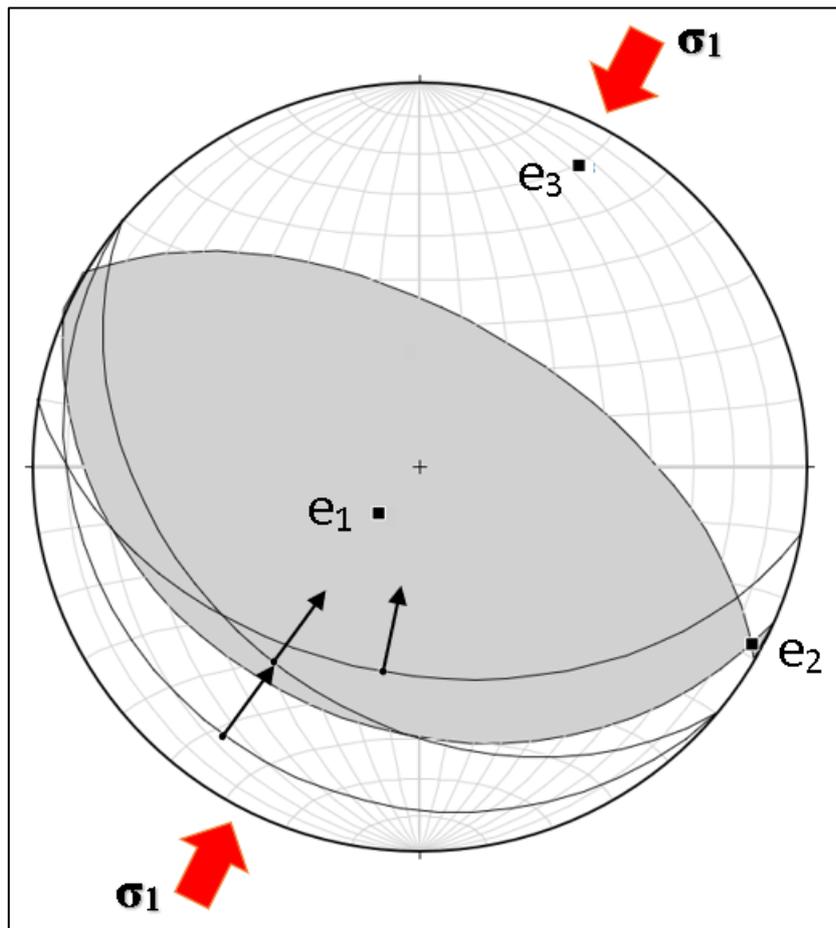


Figura 82. Análisis de la cinemática de la deformación, por medio de Diedros Rectos, del Primer Evento Tectónico (Fase Inca I).

Tabla 50. Ejes principales de deformación del Primer Evento Tectónico.

Ejes principales de deformación	Trend	Plunge
Eje mayor (e_1)	220	77
Eje intermedio (e_2)	118	3
Eje menor (e_3)	28	13

En el Segundo Evento Tectónico, se agrupó a la falla de la estación F-10 y la Falla Normal de la estación F-13, de dirección NW-SE; estas fallas de cinemática normal, produjeron una extensión del sistema en la dirección NE-SW, por lo que el esfuerzo principal menor se encuentra en esta dirección (ver figura 81); de las fallas encontradas dos poseen estrías de falla, con las cuales se estimó la dirección de los ejes principales de deformación y de los esfuerzos principales. De estas fallas se tiene evidencia un solo movimiento, el cual se debe a una extensión local y es el segundo evento tectónico reconocido en el área de investigación.

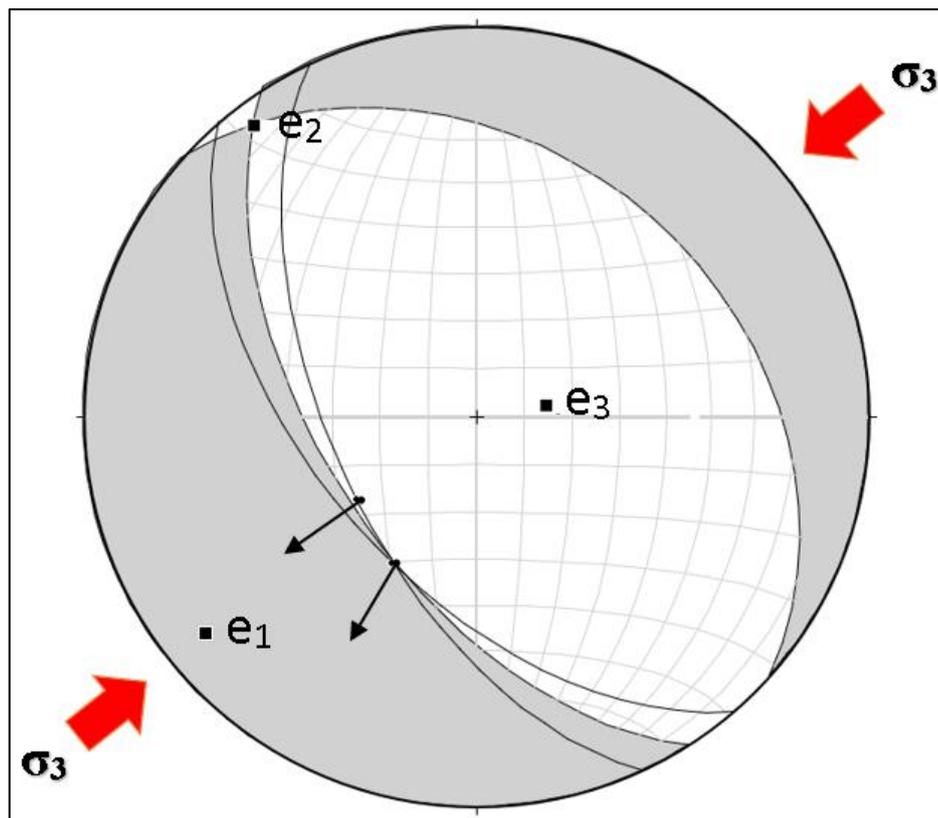


Figura 83. Análisis de la cinemática de la deformación, por medio de Diedros Rectos, del Segundo Evento Tectónico (Extensión Local).

Tabla 51. Ejes principales de deformación del Segundo Evento Tectónico.

Ejes principales de deformación	Trend	Plunge
Eje mayor (e_1)	231	13
Eje intermedio (e_2)	323	7
Eje menor (e_3)	81	75

Este Tercer Evento Tectónico, agrupa a las fallas de las estaciones F-03 y F-09; estas fallas son Inversas de alto ángulo, presentan un rumbo NW-SE y presentan dos cinemáticas, siendo la primera normal y la segunda inversa; siendo esta última la que se clasifica como el Tercer Evento Tectónico, el cual se correlaciona con la Fase Tectónica Inca II, ya se los esfuerzos principales mayores están en similar dirección (ver Figura 84).

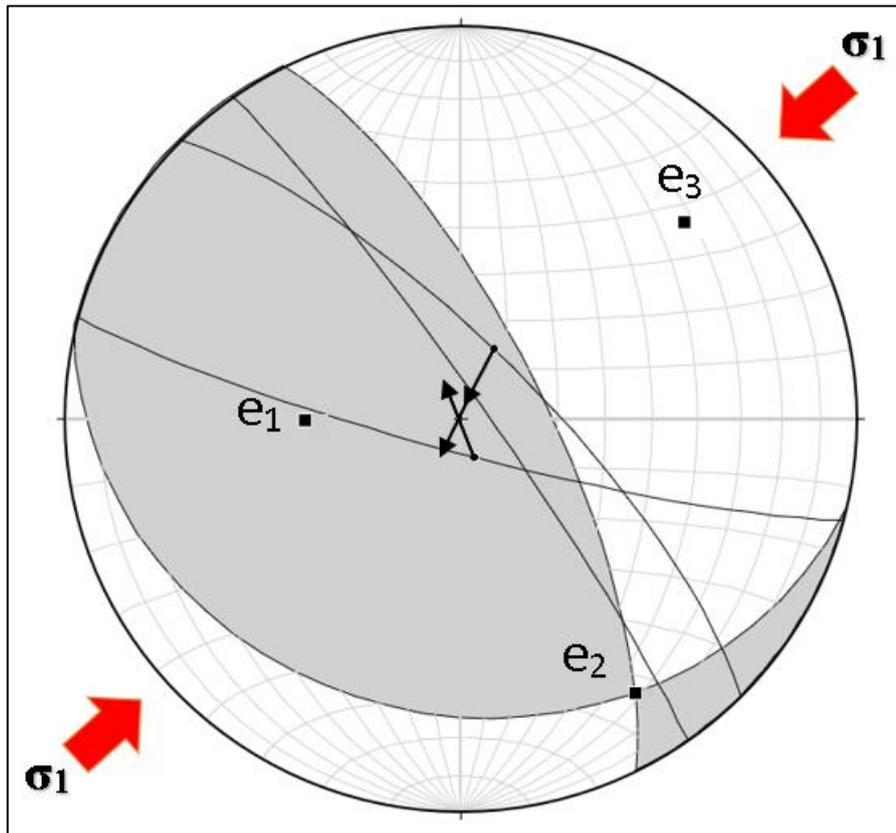


Figura 84. Análisis de la cinemática de la deformación, por medio de Diedros Rectos, del Tercer Evento Tectónico (Fase Inca II).

Tabla 52. Ejes principales de deformación del Tercer Evento Tectónico.

Ejes principales de deformación	Trend	Plunge
Eje mayor (e_1)	270	58
Eje intermedio (e_2)	148	19
Eje menor (e_3)	48	25

El último Evento Tectónico se expresa por las Fallas Inversas de elevado ángulo de las estaciones, F-05, F-06 y F-12; esto se dedujo dado que poseen una misma dirección, poseen buzamientos similares y su análisis por separado arroja la misma tendencia hacia E-W del esfuerzo principal mayor. Estas fallas tuvieron dos movimientos, el primero de fue un normal dejando planos de falla de alto ángulo, propio de las fallas normales; y luego por este cuarto evento tectónico las reactivó como con cinemática inversa sobre esos planos ya formados. La reactivación también fue un factor para agruparlas, pero a diferencia de las fallas del tercer evento tectónico; la dirección de sus esfuerzos principales tiene una tendencia más a E-W. La cinemática de estas fallas fue inversa sinistral y se formaron en una compresión NE-SW; esta se correlaciona con la Fase Tectónica Inca III.

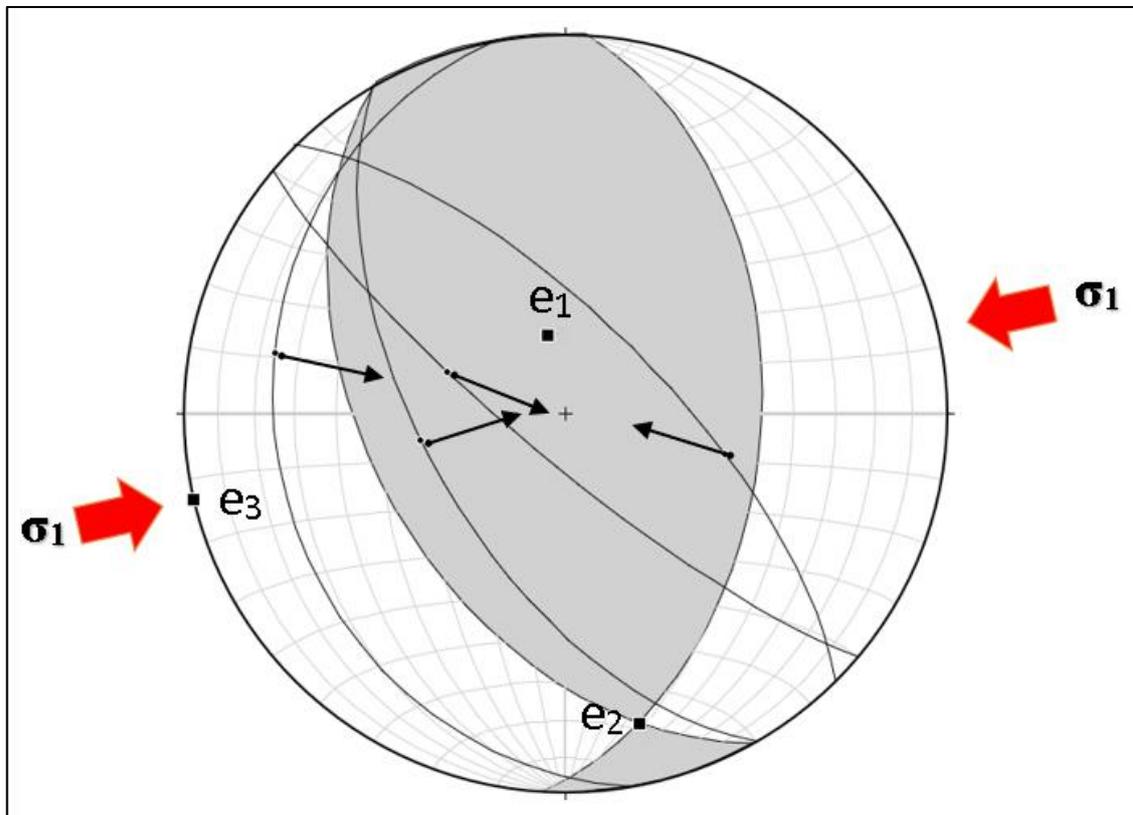


Figura 85. Análisis de la cinemática de la deformación, por medio de Diedros Rectos, del Cuarto Evento Tectónico (Fase Inca III).

Tabla 53. Ejes principales de deformación del Cuarto Evento Tectónico.

Ejes principales de deformación	Trend	Plunge
Eje mayor (e_1)	348	73
Eje intermedio (e_2)	167	17
Eje menor (e_3)	257	0,3

4.2.2. Análisis de las diaclasas.

En todas las estaciones encontramos diaclasas de estratificación y diaclasas de buzamiento, lo que nos indica una dirección preferente la cual es paralela y perpendicular a la estratificación, respectivamente; es decir poseen una dirección NW-SE y NE-SW; esto es típico de los pliegues, ya que debido a los esfuerzos se forman en estas direcciones preferentes. Vemos que todas estas diaclasas presentan un paralelismo y continuidad, lo que se puede traducir en que estas diaclasas son simultáneas y pertenecientes a un mismo proceso geológico de la formación de pliegues.

Las diaclasas de estratificación y las de rumbo son diaclasas de extensión dado que estas, están en dirección paralela al eje del pliegue y a su vez perpendiculares a la charnela; por lo que se forman por la extensión resultante de la compresión al formarse los pliegues. Así mismo se puede decir que la otra familia, diaclasas de buzamiento, también son de extensión que ya junto con las anteriores letras del alfabeto latino, tales como las letras T y H, que según Hancock (1984), es un criterio para terminar esa cinemática extensional. A la vez no se ha evidenciado lineamientos en los planos de fractura que nos dieran indicios de cinemática compresional en la formación de diaclasas. Hay una última familia que son las diaclasas oblicuas o diagonales, estas fracturas no son necesariamente tectónicas, podrían ser producto de la descompresión a elevarse los pliegues o producto de enfriamiento.

Se puede observar también que las diaclasas de las estaciones D-01, D02 y D-03; poseen direcciones que varían entre sí a pesar que no están muy distantes; esto se debe a que entre ellas se encuentran fallas normales las cuales han rotado sus planos, rotando también sus direcciones y esto es porque esas diaclasas surgieron en la formación del pliegue que los contiene y este así vez surgió antes que las fallas normales; distinguiendo se dos eventos en esa zona uno de extensión capaz de generar el set de fallas normales y el otro de compresión que formó los pliegues.

4.3. ANÁLISIS CINEMÁTICO DE LA DEFORMACIÓN DÚLTI.

El área de estudio presenta una alternancia de Pliegues Anticlinal-Sinclinal; los cuales tienen una dirección preferente NW-SE, cuya dirección coincide con la dirección de la deformación andina. Al clasificar a los pliegues según la inclinación de su eje; observamos los pliegues de las estaciones P-03 y P-04 presentan ejes deformados por lo que son clasificados como no cilíndricos; esto se observa al ver la dispersión de sus polos que no están alineados y tal disposición se debe a la presencia de pliegues secundarios y fallas que están distribuidas al largo de todo el plegamiento. Dichos pliegues secundarios están en NNE-SSE, en forma casi perpendicular al plegamiento principal. La presencia de plegamientos secundarios en forma no paralela al eje de plegamiento nos dice que hubo más de un evento de deformación; estos pliegues secundarios fueron formados por una compresión en dirección NW-SE, por lo que los vamos a asociar al evento que produjo las Fallas Normales de dirección NE-SW. La no cilíndricidad de estos pliegues también nos dice que los pliegues han sufrido más de un evento deformacional; así mismo al estar estos entre dos fallas regional, queda claro la influencia de estas fallas en su historial de deformación.

Las estaciones P-01, P-02, P-05 y P-06, son pliegues cuyos polos de sus estratos, muestran cierta tendencia al paralelismo de capas por lo que se las clasificó como pliegues cilíndricos; pero dicha tendencia no del todo paralela, esto se explica por los diferentes eventos tectónicos ocurridos en la zona, que han deformado el eje de plegamiento. A la vez su volcamiento se debe a eventos posteriores que los replegaron. Las estaciones P-02 y P-5, son Pliegues Asimétricos que presentan una mejor cilíndricidad que el resto, por lo su deformación no fue mucha en comparación los demás pliegues.

Los pliegues se asociarían con fallas inversas de rumbo paralelos a sus ejes; tomando en cuenta esto y sumado al tiempo relativo, los pliegues se relacionan con las fallas inversas de las estaciones F-11 y la F-13; por lo que se formaron para el primer evento tectónico correlacionado con la tectónica Fase Inca I. Replegándose para los eventos posteriores ya descritos.

4.4. ANÁLISIS DE INDICADORES CINEMÁTICOS.

La mayoría de indicadores cinemáticos fueron tratados para determinar la cinemática de fallas; aquí se verán aquellos que nos revisaron y analizan a continuación:

4.4.1. Análisis de Foliaciones.

Las foliaciones poseen un rumbo paralelo al eje de los pliegues, lo que nos dice que su formación está relacionada con los pliegues, teniendo una deformación NW-SE y a su vez corrobora que los pliegues se formaron por esfuerzos compresivos de dirección NE-SW. Estas estructuras también ayudaron a determinar la cinemática de las fallas regionales; demostrando que estas poseen una componente de rumbo sinistral.

4.4.2. Análisis de Fracturas extensionales en echelón.

En el flanco SW del sinclinal y en el flanco NE del anticlinal de las estaciones P-03 y P-04; ubicados en el Sector la Amistad; se observa, en varias estaciones estructurales, fracturas tensionales en echelón cuya dirección va desde N225° a N235°. Estas fracturas son generadas por un cizallamiento de rumbo NE-SW y el cual surgió como producto del movimiento de la componente de rumbo de las fallas de las estaciones F-05 y F-06. Este movimiento a su vez generó dos cinemáticas; una extensional de dirección NW-SE y otra compresional de dirección NE-SW; la extensional es la responsable de la formación de dichas fracturas.

De lo expresado líneas arriba se puede decir que las estas fracturas tensionales surgieron en por el mismo proceso que la deformación andina, es decir fueron producidas por un esfuerzo se dirección NE-SW y que este es producto de la subducción de placas; por ende, estas deformaciones encontradas en campo son producto de la subducción de placas. Así mismo se observa que esta extensión está relacionada con la zona extensional (menor zona compresional afecta por el esfuerzo σ_3) de la formación de pliegues, ya que poseen direcciones de deformación similares.

En cuanto a los esfuerzos el esfuerzo principal mayor responsable de la formación de las fracturas tensionales en los flancos, posee una dirección similar que el esfuerzo principal mayor responsable la compresión mayor en los pliegues estudiados.

4.4.3. Análisis de fracturas extensionales.

Las fracturas extensionales de rumbo paralelo a los estratos, nos indican que hubo una extensión en la dirección perpendicular a estos es decir en dirección NE-SW; lo que correspondería a la extensión producida en el segundo evento tectónico ya descrita. El otro

grupo de fracturas extensionales, ósea las perpendiculares a planos; en el caso de las fallas, nos indica que hubo una extensión en dirección NW-SE; siendo cada una producida por tercer y segundo evento tectónico, respectivamente, ocurrido en la zona de estudio.

CAPÍTULO V.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES.

- Se caracterizó a las estructuras; obteniendo: 2 Pliegues Sinclinales Volcados, 3 Sinclinales Asimétricos y 3 Anticlinales Asimétricos, 9 Fallas Normales, 6 Fallas Inversas, 1 Falla Normal-Dextral, 1 Falla Normal-Sinistral, 3 Fallas Inversa-Sinestrales, 2 Fallas Inversa-Dextrales Y 5 Fallas Sinestrales. En las diaclasas se identificaron Diaclasas de Estratificación, de Buzamiento y Diagonales. Las fracturas se las caracterizó según su origen, donde primó las Fracturas Extensionales.
- La deformación tectónica tuvo una dirección principal NW-SE, la cual es la dirección de la deformación andina; en esta dirección se formaron las fallas, pliegues principales y algunas diaclasas; en esta dirección principal el sistema de elevó, extendió, falló y plegó. También se exhibe otra dirección de deformación NE-SW que surge como consecuencia de la deformación principal, en donde se formaron pliegues y fallas menores.
- Se identificó cuatro eventos de deformación tectónica. El Primer Evento fue compresivo y corresponde a la Fase Tectónica Inca I, la cual elevó a las Formaciones y formó a los pliegues y foliaciones y por último creó Fallas Inversas de dirección NW-SE. Luego el Segundo Evento Tectónico que expandió localmente el sistema, en la dirección NE-SW, formando Fallas Normales de dirección NW-SE y pliegues NE-SW. El Tercer Evento Tectónico, fue compresivo y se lo asocia con la Fase Tectónica Inca II; la cual reactivó a las Fallas Normales como Fallas Inversas, creó nuevas Fallas Inversas y replegó a los pliegues previos. El Cuarto Evento Tectónico reconocido, fue compresivo y se correlaciona con a la Fase Inca III; esta compresión se reactivó a fallas normales generando fallas inversas de alto ángulo, elevó a las Formaciones y continuó con el replegamiento.

-

5.2. RECOMENDACIONES.

- A los futuros profesionales de la Escuela Académico Profesional de Ingeniería Geológica (EAPIG), se recomienda a los complementar este trabajo con un estudio dinámico estructural; para ello se debe analizar a detalle los esfuerzos tectónicos y así conocer su relación con la deformación.

- Se recomienda a los estudiantes de la EAPIG, realizar un modelamiento geológico-estructural, con softwares especializados como Leapfrog Geo o Mine Sighth; a fin de entender con mayor detalle la evolución geométrica y cinemática de la deformación, y la relación espacio-tiempo entre estructuras tectónicas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ayala, L. 2018. Aplicaciones de los indicadores cinemáticos en Geología Regional y Exploración. Lima, Perú. SGP (Sociedad Geológica del Perú). s.p. (39 p). Consultado 01 oct. 2019. Disponible en <http://www.sgp.org.pe/wp-content/uploads/LAyala-SGP-180227.compressed.pdf>
- Ayala, L. s.f. Identificación de indicadores cinemático en Geología Estructural. Lima, Perú, s.e. s.p. (10 p). Consultado 01 oct. 2019. Disponible en <https://www.explorock.com/indicadores-cinematicos-en-geologia-estructural/>
- Bazán, O. s.f. Tectónica Andina y su componente cizallante. Alusivo al norte del Perú. Cajamarca, Perú. Universidad Nacional de Cajamarca. (26p). Consultado 20 de oct. 2021. Disponible en <https://es.slideshare.net/laurarojasperea/tectonica-andina-y-su-componente-cizallante>
- Billings, MP. 1946. Structural Geology. 2 ed. New York, Estados Unidos de América. Practice-Hall, Inc. 473 p.
- Blandón, A. 2002. Principios de Estratigrafía. Medellín, Colombia. Universidad Nacional de Colombia. p. 1-2. Consultado 08 oct. 2019. Disponible en <http://bdigital.unal.edu.co/12331/1/42968477.2002.Parte1.2.pdf>.
- Cabanillas Aguilar, R. 2019. Investigación Educativa: Arquitectura del Proyecto de Investigación y el Informe de Tesis. 1 ed. Cajamarca. Martínez Compañón Editores. 375p.

- Casas, AM; Gil, I; Simón, JL. 1990. Los métodos de Análisis de Paleoesfuerzos a partir de poblaciones de fallas: Sistémica y Técnicas de Aplicación. Estudios Geol. Universidad de Zaragoza. (46) 385-398.
- De Vicente, G.; Muñoz, A.; Giner, JL. 1992. El uso del método de los diedros rectos: implicaciones a partir del modelo de deslizamiento del análisis poblacional de fallas. Madrid, España. Sociedad Geológica de España. 5(3-4): 7-19.
- Davis, GH; Reynolds, SJ; Kluth CF. 2012. Structural Geology of rock y regions. 3 ed. Estados Unidos de América. John Wiley & Sons, Inc. 861p.
- Doblas, M. (1998). Slickenside kinematic indicators. Madrid, España. Tectonophysics. (295): 187-197.
- Fernández, C.; Díaz, M.; Díaz, J. 2017. Las zonas de cizalla dúctil como recurso didáctico para entender la deformación de las rocas: El ejemplo de la zona de cizalla Sudibérica (Macizo Ibérico suroccidental). Sevilla, España. Enseñanzas de las ciencias de la Tierra. 21(1): 16-26.
- Fossen, H. 2010. Structural Geology. 2 ed. Nueva York, Estados Unidos de Norte América. Cambridge University Press. 481p.
- Geoffrey, A. (2016). Understanding Brittle Deformation at the Olkiluoto Site: Literature Compilation for Site Characterization and Geological Modelling. Finlandia. Posiva OY. 167p.
- Greim, W. (2015). Fallas especiales: Sistema de Riedel. Consultado 01 nov. 2019. Disponible en: <https://www.geovirtual2.cl/Geoestructural/0407-Riedel.pdf>.

IICA (Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura). 2016. Redacción de referencias bibliográficas: normas técnicas para ciencias agroalimentarias, IICA, CATIE. 5 ed, San José, Costa Rica. 79 p.

Introduction to Structural Geology. Workbook 1: Structural Geology – the Basics. s.f. California, Estados Unidos de América. University of Leeds. 34 p. Consultado 12 oct. 2018. Disponible en https://www.see.leeds.ac.uk/fileadmin/Documents/Admissions/Masters/step-up/Introduction_to_structural_geology_1.pdf.

Katz, Y.; Weinberger, R.; Aydin, A. 2004. Geometry and kinematic evolution of Riedel shear structures, Capitol Reef National Park, Utah. Jerusalem, Israel. Elsevier Ltd. (26): 491-501.

McClay KR. 1991. The Mapping of Geological Structures. 2 ed. Inglaterra. John Wiley & Sons, Inc. 167p. (Series Editor-Keith Cox, v. 2).

Marambio, CE. 2015. Petrología y análisis estructural de cuerpo metamórficos e ígneos del complejo metamórfico Bahía Mansa. Santiago, Chile. Universidad de Chile. 132p.

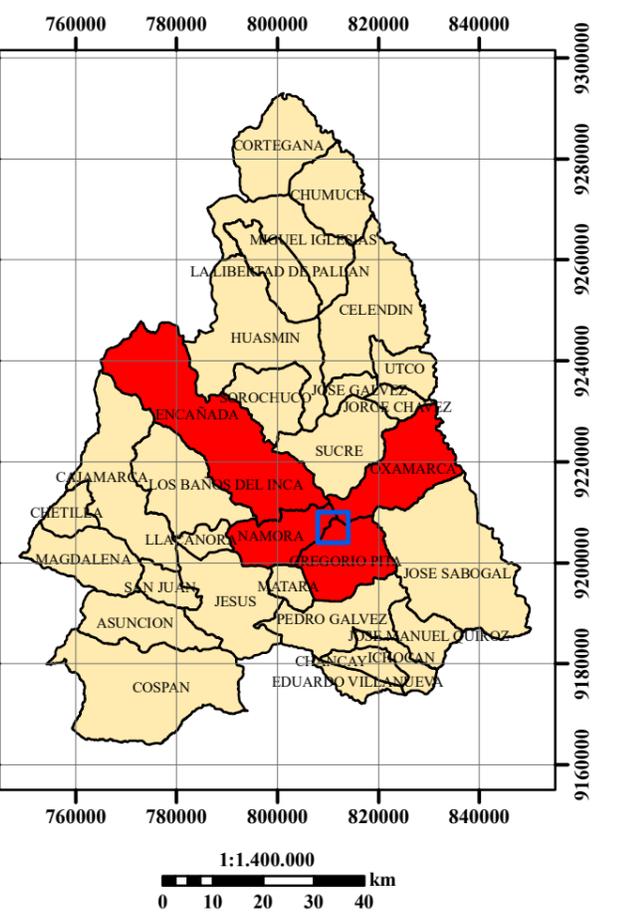
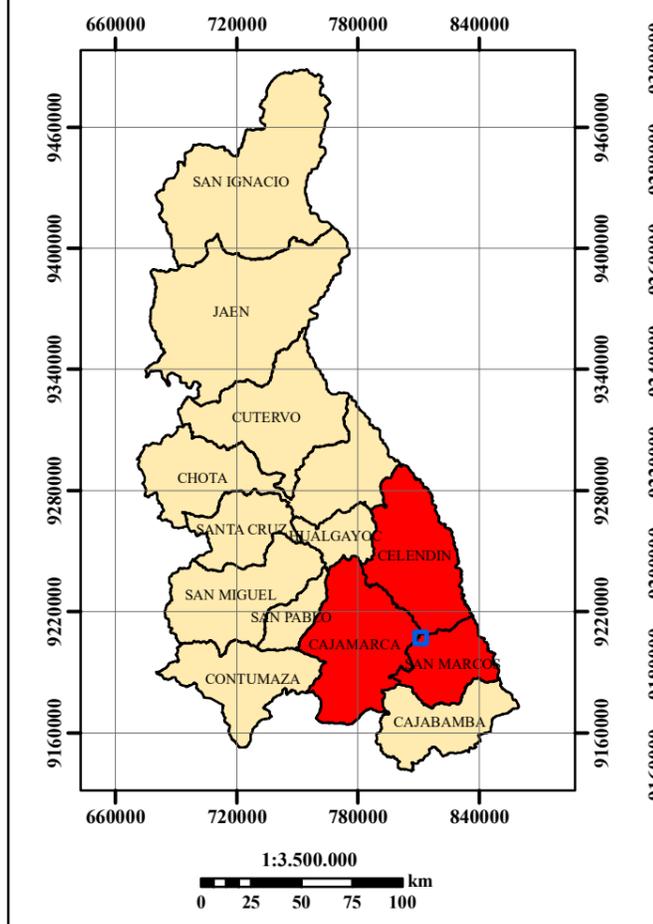
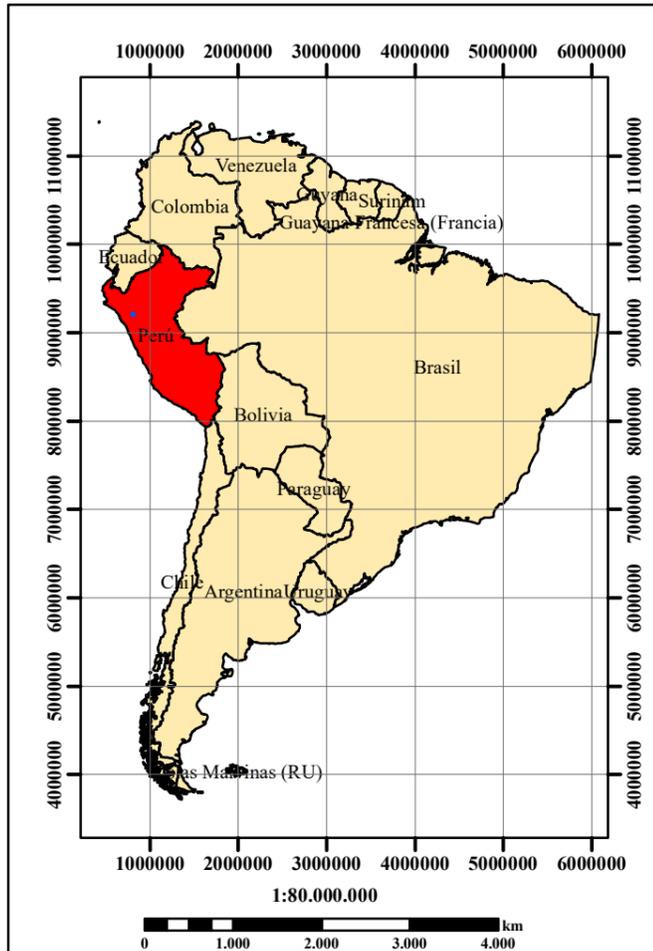
Martínez, JR. 2003. Geología Estructural y Dinámica Global. Salamanca, España. Departamento de Geología de la Universidad de Salamanca. 429p.

Niemeyer, H. 1999. Apuntes de Geología Estructural. Antofagasta, Chile. s.e. Consultado 15 oct. 2019. Disponible en https://www.u-cursos.cl/usuario/c19094b1ea89f1f08e243796b671e2e5/mi_blog/r/Geologia_Estructural_-_Niemeyer.pdf

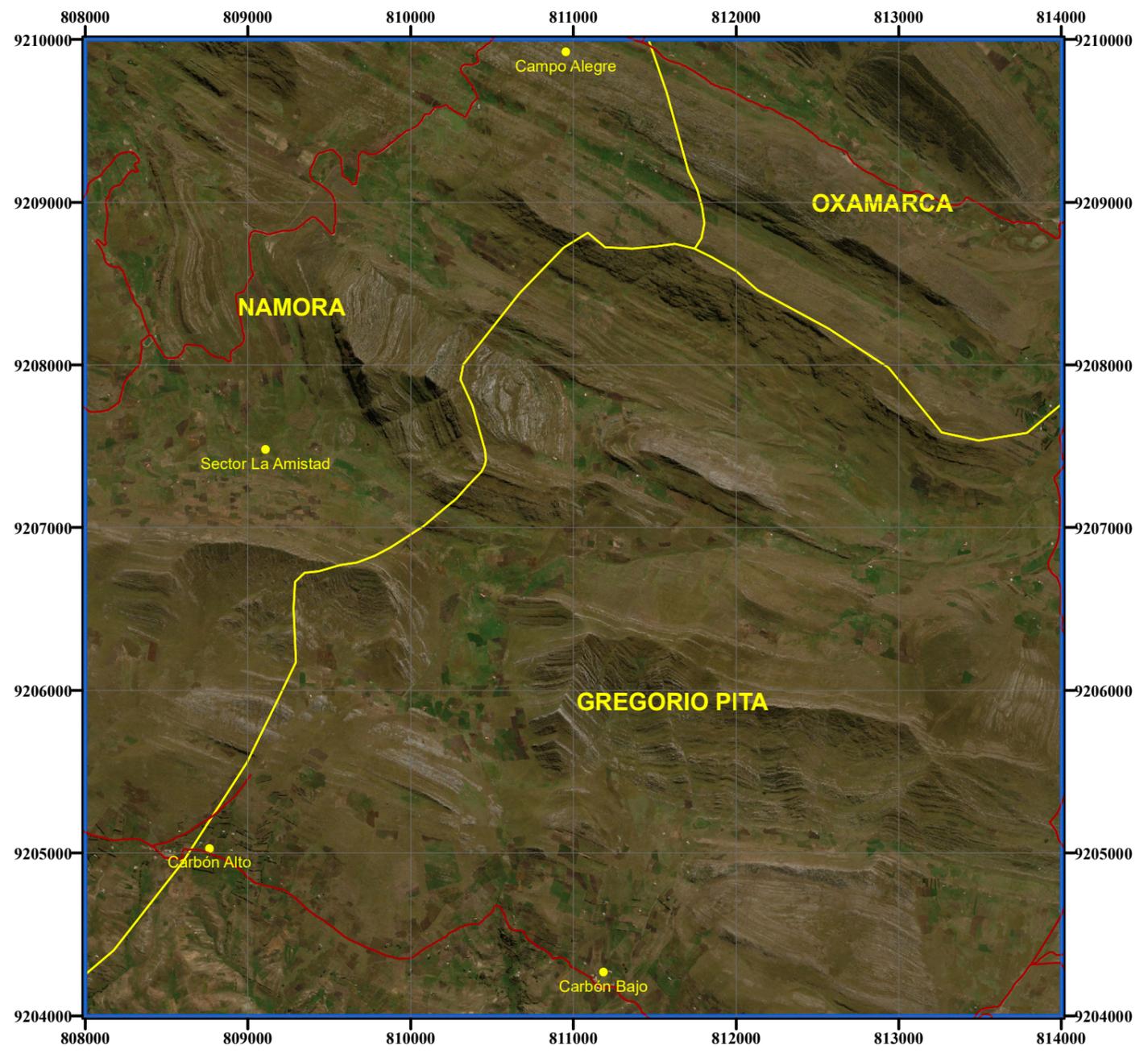
- Parada, RE. 2008. Análisis estructural del borde oriental de la cuenca terciaria de abanico en el Valle del rio Teno, 7^{ma} región. Santiago, Chile. Universidad de Chile. 69p.
- Reyes, L. 1980. Geología de los cuadrángulos de Cajamarca, San Marcos y Cajabamba. Hojas (15-f, 15-g y 16-g). Boletín N° 31. Cajamarca, Perú. Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (INGEMMET). 22p-32p, 47p-55p.
- Rivas, F. 2015. Sistema de adquisición de datos automatizado para pruebas mecánicas uniaxiales y triaxiales. Morelos, México. 13p. Consultado 25 nov. 2018. Disponible en https://www.researchgate.net/publication/281376092_Sistema_de_adquisicion_de_datos_automatizado_para_pruebas_mecanicas_uniaxiales_y_triaxiales
- Rivera, H. 2005. Geología General. 2 ed. Lima, Perú: Comunicación on time. p. 307 – 327.
- Rodríguez, RC. 2016. Método de investigación Geológico-Geotécnico para el análisis de inestabilidad de laderas por deslizamientos zona Ronquillo-Corisorgona. Lima, Perú. Universidad Mayor de San Marcos. 151p.
- Sarabia Orihuela, CA. 2019. Metodología de la Investigación Científica: Módulo para docentes y estudiantes de Educación Superior. 1 ed. Cajamarca, Perú. Imprenta Publimas. 221p.
- Scholz, CH. 1989. Mechanics of Faulting. Earth Planet. California. Estados Unidos de América. Annual Reviews Inc. (17): 309-334.
- Suppe, J. 1985. Principles of Structure Geology. New Jersey, Estados Unidos de América: Prentice-Hall, Inc. 537p.

- Tapia, FF. 2010. En su investigación Análisis Estructural del sector occidental de la faja plegada y corrida de Malargüe en el curso superior del río Colorado de Lontué, Región del Maule, Chile. Santiago, Chile. Universidad de Chile. 101p.
- Tarback EJ.; Lutgens, FK. 2005. Ciencias de la Tierra: Una introducción a la Geología Física. 8va ed. Madrid, España. Pearson Educación S.A. p. 283 – 306.
- Tolson, G. 2008. Un catálogo de Indicadores cinemáticos en rocas cizalladas. Consultado 30 oct. 2019. Disponible en: <https://geocosas.files.wordpress.com/2008/03/indicadorescinematicos.pdf>
- Trigueños, LC. 2018. Apuntes de Geología Estructural con ejercicios. México. Tesis de pregrado. Universidad Autónoma de México, México. 204p.
- Van der Pluijm, BA.; Marsahak, S. 2004. Earth Structure: An introduction to structural geology and tectonics. 2da ed. New York, Estados Unidos de América: W. W. Norton & Company, Inc. p. 1 – 335.

ANEXOS



PLANO DE UBICACIÓN



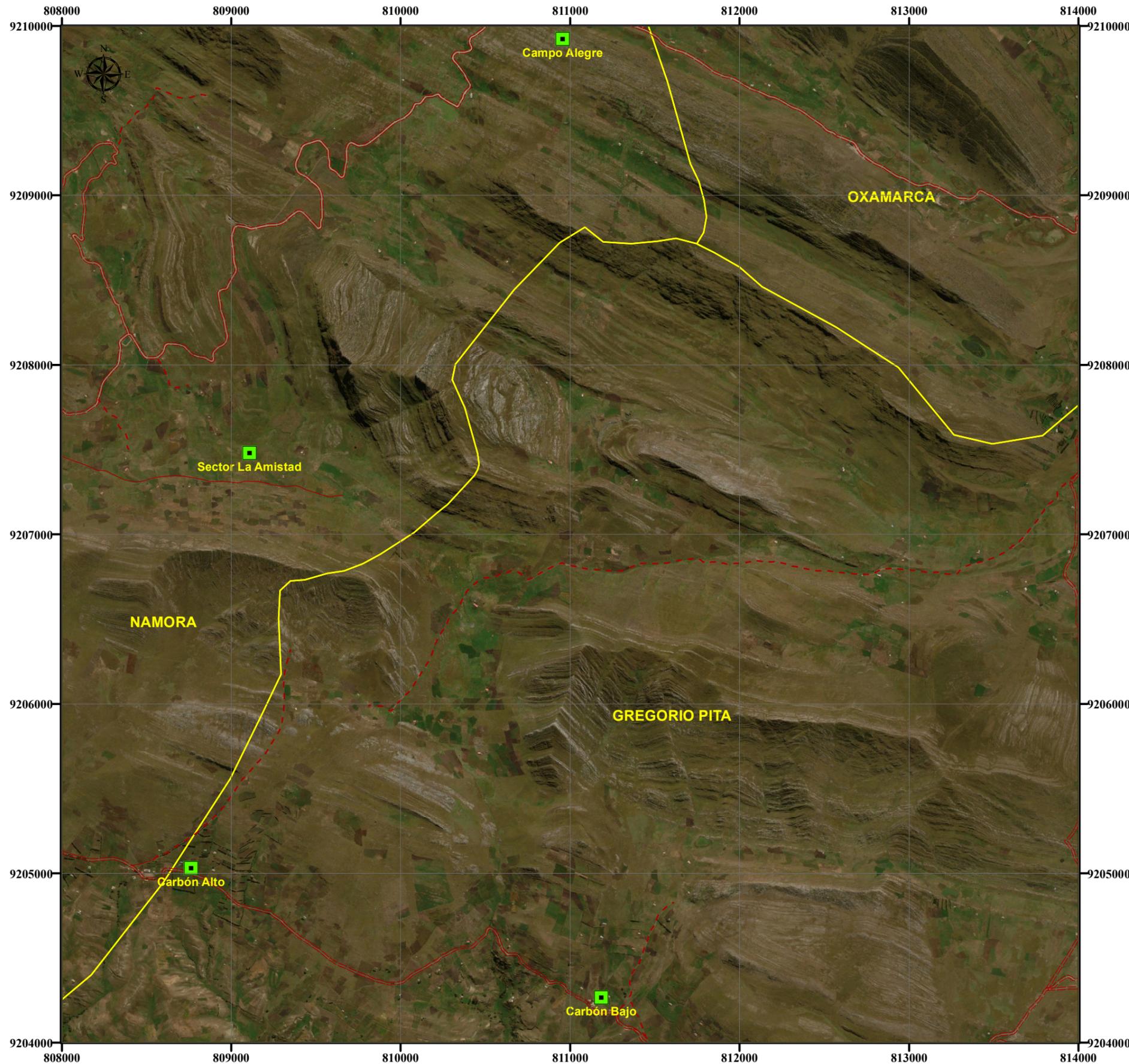
LEYENDA

- Área de trabajo
- Países, departamentos, provincias y distritos
- Vías
- Pueblos

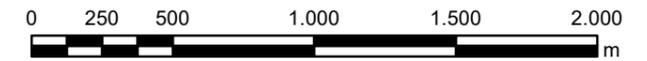
UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA		01	
TÍTULO:	PLANO DE UBICACIÓN		PLANO N°:
TESISTA:	BACH. LUIS GONZALO LOZANO LAMADRID		
ASESOR:	DR. ALEJANDRO CLAUDIO LAGOS MANRIQUE		
ESCALA:	Indicada	FECHA:	23/10/2021

Sistema de Coordenadas: WGS84 UTM Zona 17S
 Datum: Word Geodetic System 1984
 Proyección: Universal Transverse Mercator
 Zona: 17 Sur
 Unidad: Metro

IMAGEN SATELITAL EN COLOR VERDADERO



LEYENDA	
	Caserío
	Camino de heradura
	Carretera afirmada
	Trocha
	Distrito

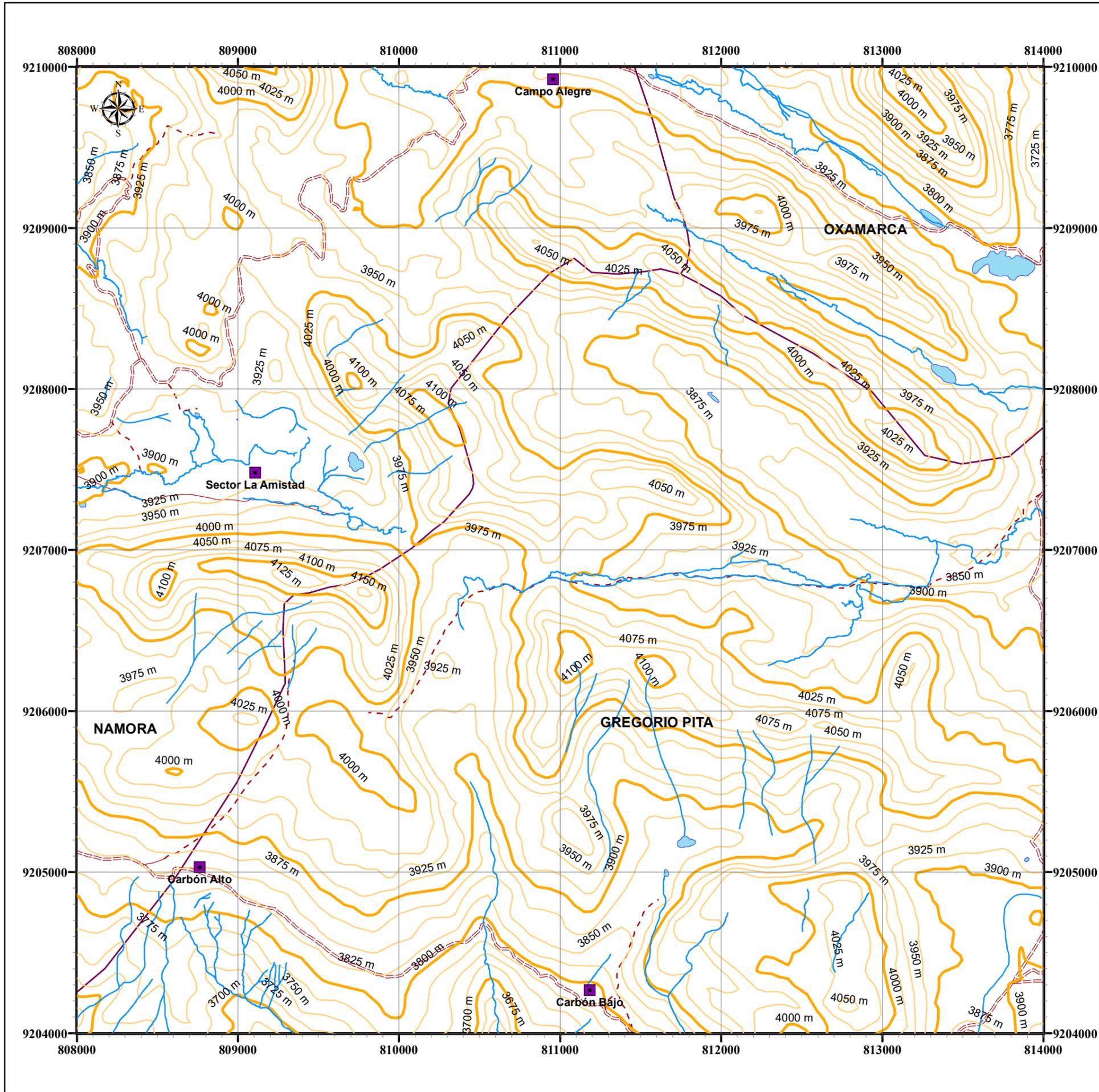


1:25.000

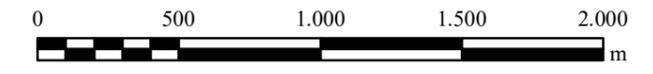
Sistema de Coordenadas: WGS 84 - UTM - 17S
 Datum: Word Geodesic System 1984
 Proyección: Universal Transverse Mercator
 Zona: 17 Sur
 Unidad: Metro

 UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA			
TÍTULO:	IMAGEN SATELITAL EN COLOR VERDADERO	PLANO N°: 02	
TESISTA:	BACH. LUIS GONZALO LOZANO LAMADRID		
ASESOR:	DR. ALEJANDRO CLAUDIO LAGOS MANRIQUE		
ESCALA:	1 : 25,000		
		FECHA:	06/11/2021

PLANO TOPOGRÁFICO



LEYENDA	
	Caserío
	Quebradas
	Curvas de nivel secundarias
	Curvas de nivel principales
	Camino de heradura
	Carretera afirmada
	Trocha
	Lagunas
	Distritos

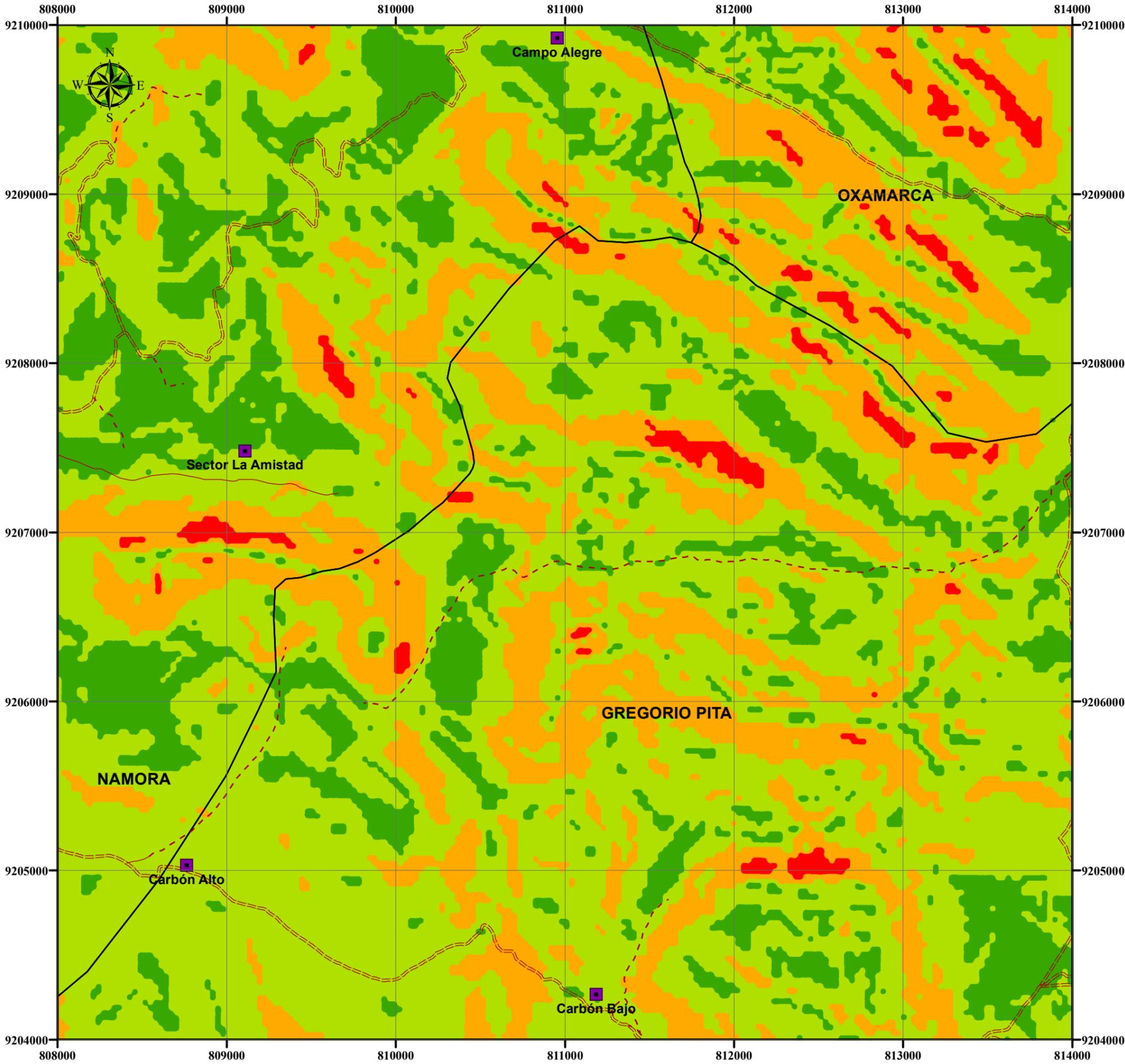


1:25.000

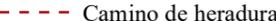
Sistema de Coordenadas: WGS 84 - UTM Zone - 17S
 Datum: Word Geodesic System 1984
 Proyección: Universal Transverse Mercator
 Zona: 17 Sur
 Unidad: Metro

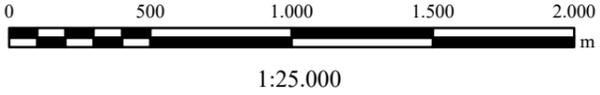
 UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA		PLANO N°: 03	
TÍTULO:	PLANO TOPOGRÁFICO		
TESISTA:	BACH. LUIS GONZALO LOZANO LAMADRID		
ASESOR:	DR. ALEJANDRO CLAUDIO LAGOS MANRIQUE		
ESCALA:	1 : 25,000	FECHA:	06/11/2021

PLANO GEOMORFOLÓGICO



LEYENDA	
Unidad Geomorfológica	Grados
 Planicies	0° - 8°
 Lomadas	8° - 20°
 Laderas	20° - 25°
 Escarpas	> 50°

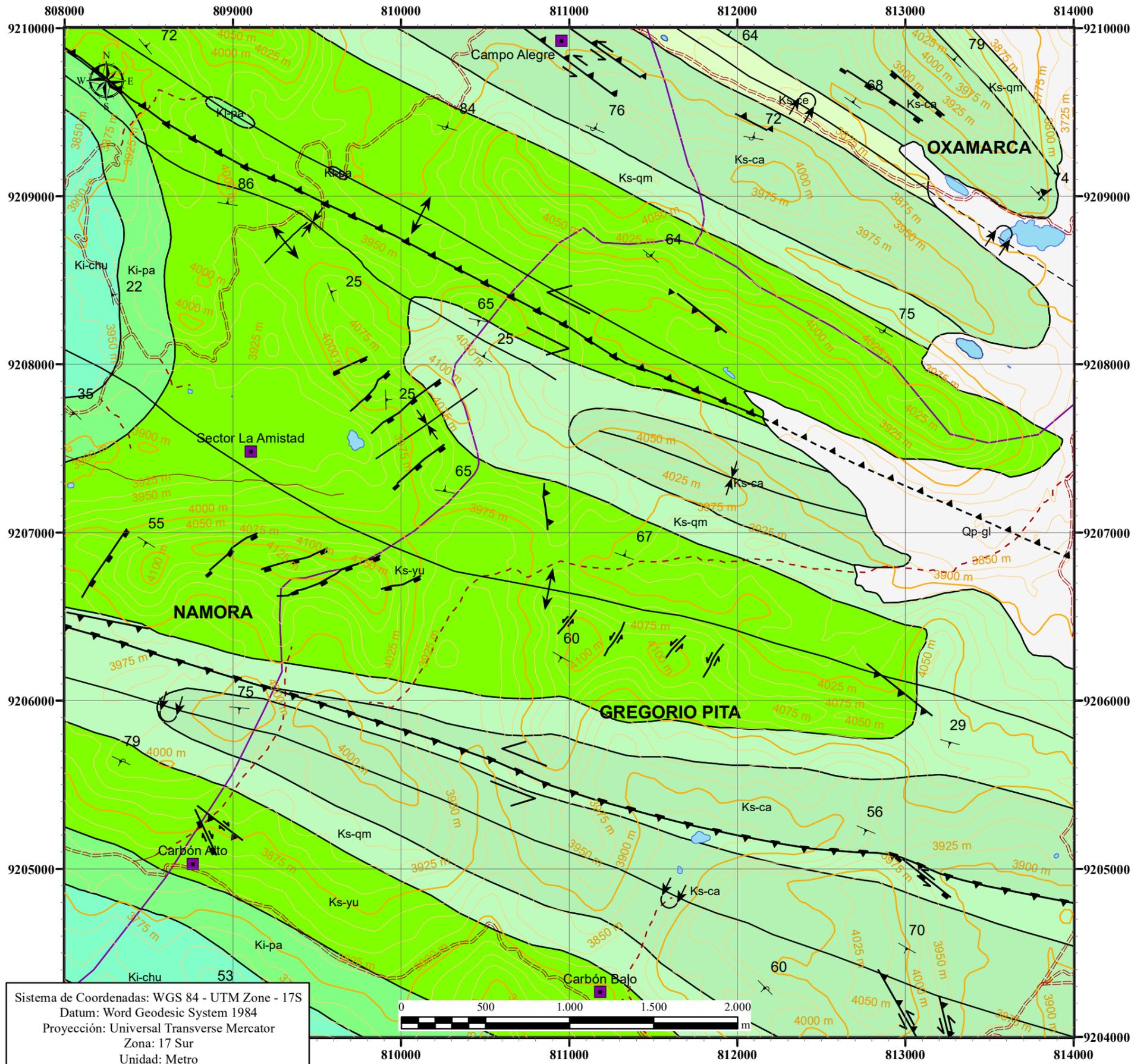
SIMBOLOGÍA	
	Caserío
	Camino de heradura
	Carretera afirmada
	Trocha
	Distrito



Sistema de Coordenadas: WGS 84 - UTM Zone - 17S
 Datum: Word Geodesic System 1984
 Proyección: Universal Transverse Mercator
 Zona: 17 Sur
 Unidad: Metro

 UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA		
TÍTULO:	PLANO GEOMORFOLÓGICO	PLANO N°: 04
TESISTA:	BACH. LUIS GONZALO LOZANO LAMADRID	
ASESOR:	DR. ALEJANDRO CLAUDIO LAGOS MANRIQUE	
ESCALA:	1 : 25,000	
		FECHA: 06/11/2021

PLANO GEOLÓGICO



UNIDADES LITOSTRATIGRÁFICAS			
ERA	PERIODO	ÉPOCA	FORMACIÓN
CENO-ZOICO	CUATERNARIO	Pleistoceno	Qp-gl Depósito Glaciar
MESOZOICO	CRETÁCEO	Superior	Ks-ca Formación Cajamarca
			Ks-qm Formación Quilquiñán Mujarrún
			Ks-yu Formación Yumagual
		Inferior	Ki-pa Formación Pariatambo
			Ki-chu Formación Chúlec
			Ki-in Formación Inca

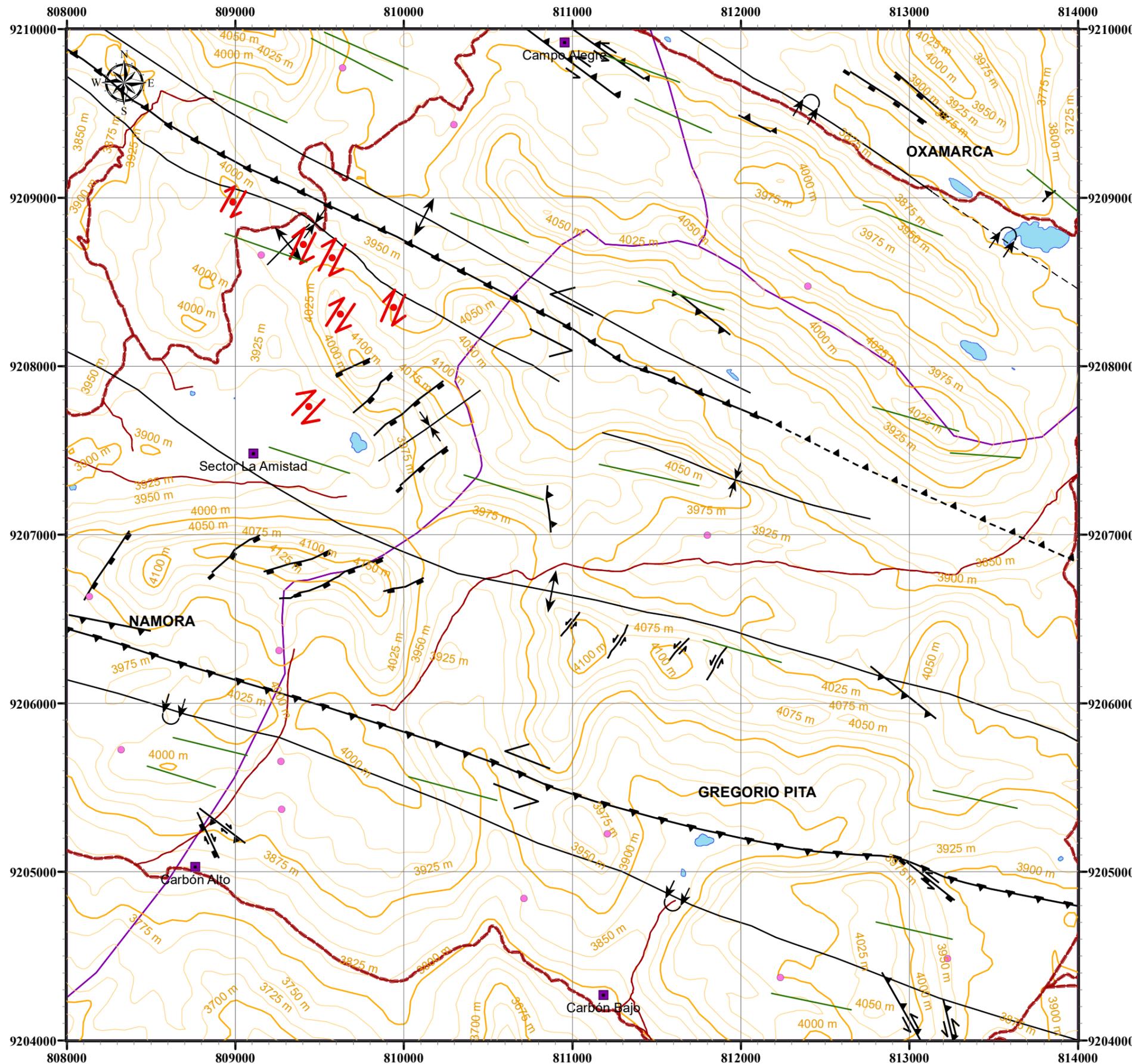
SIMBOLOGÍA	
	Caseros
	Rumbo y buzamiento de estratos
	Rumbo y buzamiento de estratos invertidos
	Curvas de nivel mayores (cada 100 m)
	Curvas de nivel menores (cada 25 m)
	Camino de herradura
	Trocha carrozable
	Carretera afirmada
	Falla Inversa
	Falla normal
	Falla inversa sinistral
	Falla inversa dextral
	Falla inversa sinistral inferida
	Falla normal sinistral
	Falla normal dextral
	Falla sinistral
	Pliegue sinclinal volcado
	Pliegue sinclinal volcado inferido
	Pliegue anticlinal asimétrico
	Pliegue sinclinal asimétrico
	Laguna
	Distrito

Sistema de Coordenadas: WGS 84 - UTM Zone - 17S
 Datum: Word Geodesic System 1984
 Proyección: Universal Transverse Mercator
 Zona: 17 Sur
 Unidad: Metro



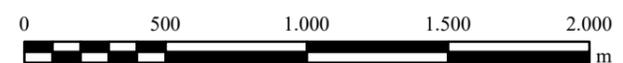
 UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA		PLANO N°: 05	
TÍTULO:	PLANO GEOLÓGICO		
TESISTA:	BACH. LUIS GONZALO LOZANO LAMADRID		
ASESOR:	DR. ALEJANDRO CLAUDIO LAGOS MANRIQUE		
ESCALA:	1 : 25,000	FECHA:	06/11/2021

PLANO ESTRUCTURAL



LEYENDA

- Caserios
- Fracturas extensionales en echelón
- Fracturas extensionales
- Foliaciones
- ↔ Zona de cizalla
- Curvas de nivel mayores (cada 100 m)
- Curvas de nivel menores (cada 25 m)
- - - Camino de herradura
- Trocha carrozable
- = = = Carretera afirmada
- ▲▲ Falla Inversa
- Falla normal
- ↔↔ Falla inversa sinistral
- ↔↔ Falla inversa dextral
- ↔ Falla inversa sinistral inferida
- ↔ Falla normal sinistral
- ↔ Falla normal dextral
- ↔↔ Falla sinistral
- ⤵ Pliegue sinclinal volcado
- ⤵ Pliegue sinclinal volcado inferido
- ↔↔ Pliegue anticlinal asimétrico
- ↔↔ Pliegue sinclinal asimétrico
- Laguna
- Distrito

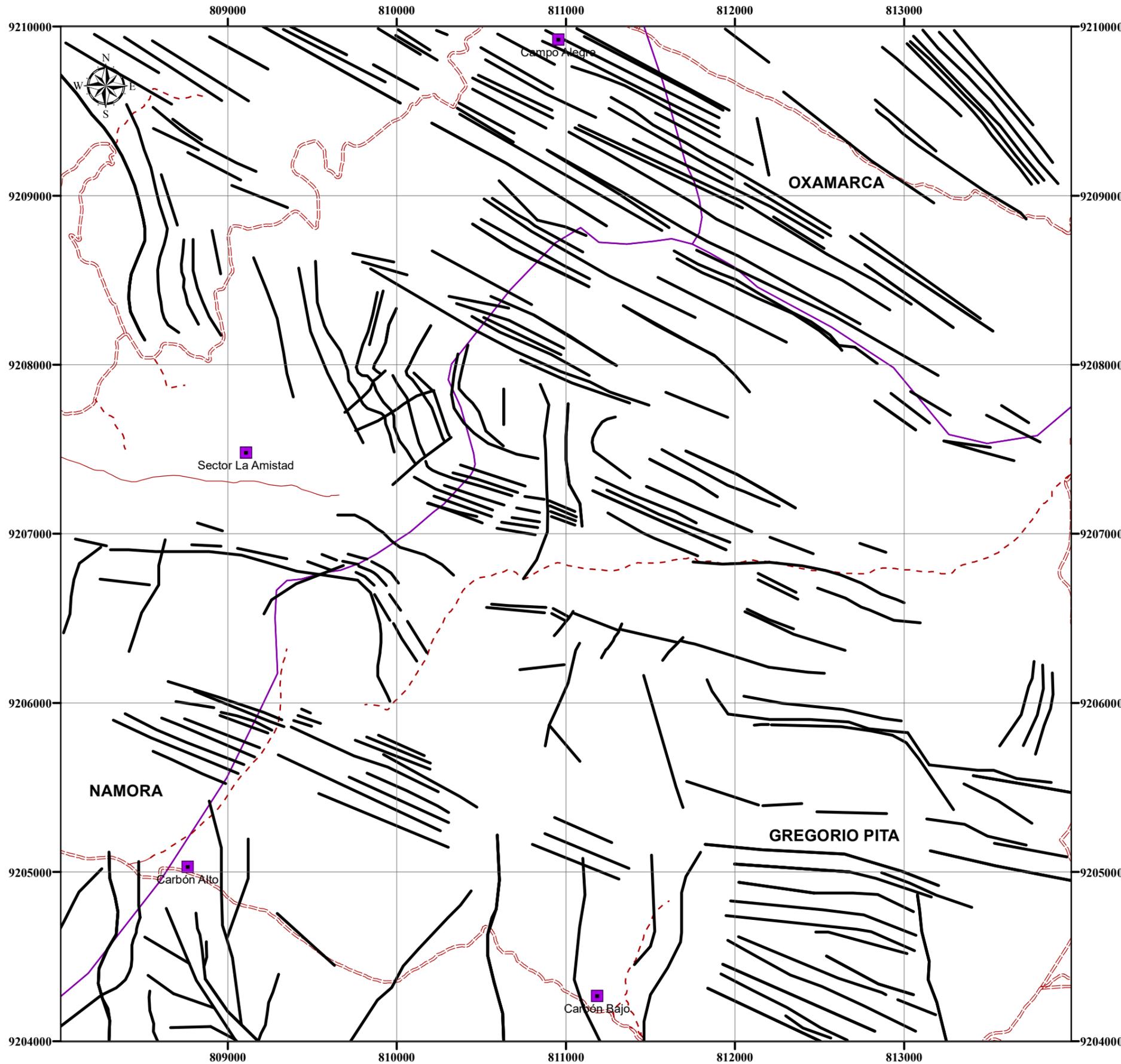


1:25.000

Sistema de Coordenadas: WGS 84 - UTM Zone - 17S
 Datum: Word Geodesic System 1984
 Proyección: Universal Transverse Mercator
 Zona: 17 Sur
 Unidad: Metro

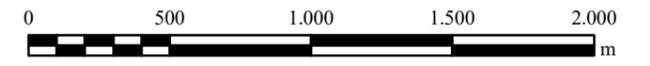
UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA		06		
TÍTULO:	PLANO ESTRUCTURAL		PLANO N°:	
TESISTA:	BACH. LUIS GONZALO LOZANO LAMADRID			
ASESOR:	DR. ALEJANDRO CLAUDIO LAGOS MANRIQUE			
ESCALA:	1 : 25,000	FECHA:	06/11/2021	

PLANO DE LINEAMIENTOS



LEYENDA

- Caserío
- Lineamientos
- Camino de heradura
- Carretera afirmada
- Trocha
- Distritos

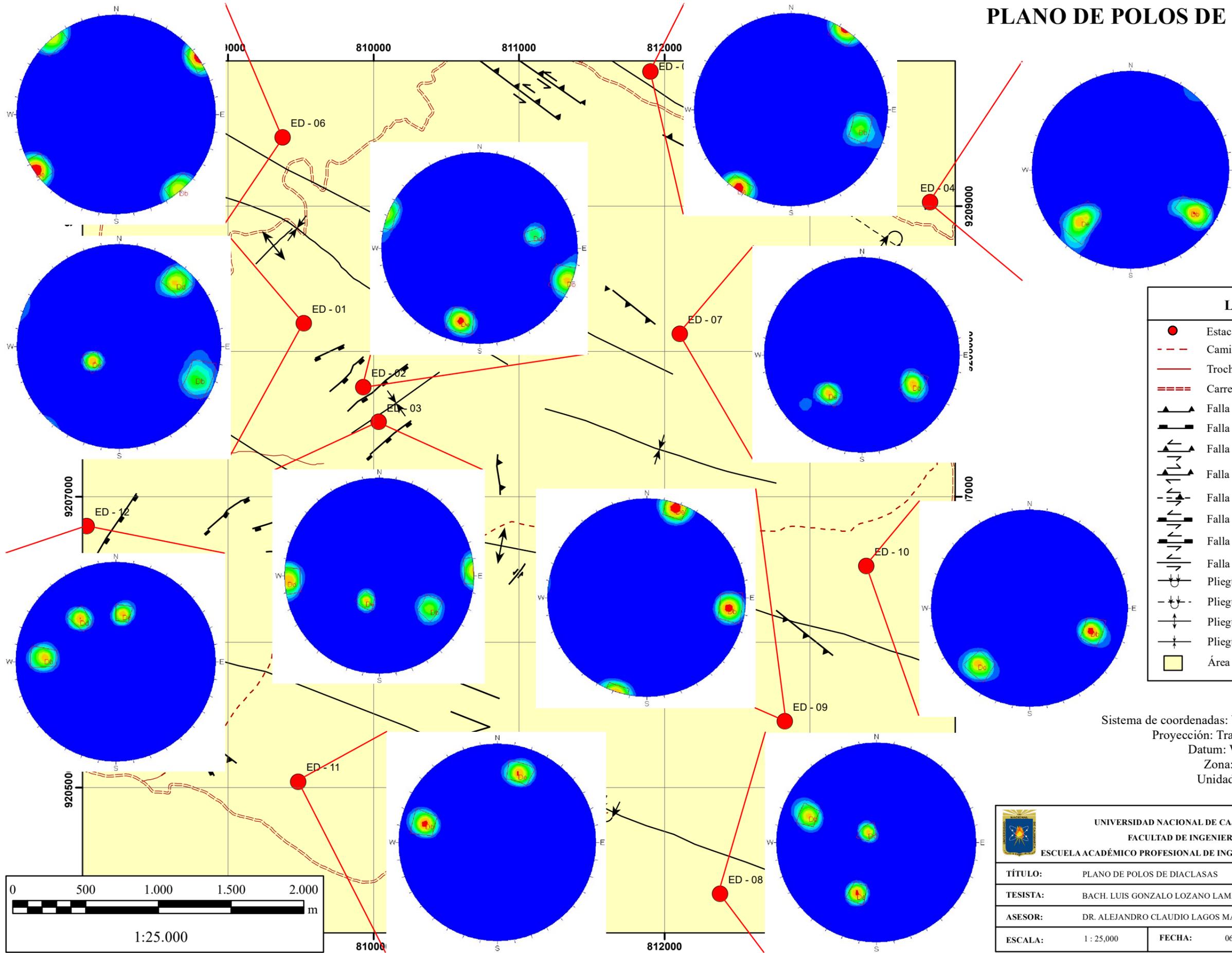


1:25.000

Sistema de coordenadas: WGS 1984 UTM Zone 17S
 Proyección: Transverse Mercator
 Datum: WGS 1984
 Zona: 17 Sur
 Unidad: Metros

	UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA	
TÍTULO:	PLANO DE LINEAMIENTOS	PLANO N°: 07
TESISTA:	BACH. LUIS GONZALO LOZANO LAMADRID	
ASESOR:	DR. ALEJANDRO CLAUDIO LAGOS MANRIQUE	
ESCALA:	1 : 25 000	
	FECHA:	06/11/2021

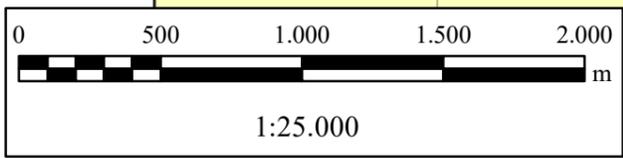
PLANO DE POLOS DE DIACLASAS



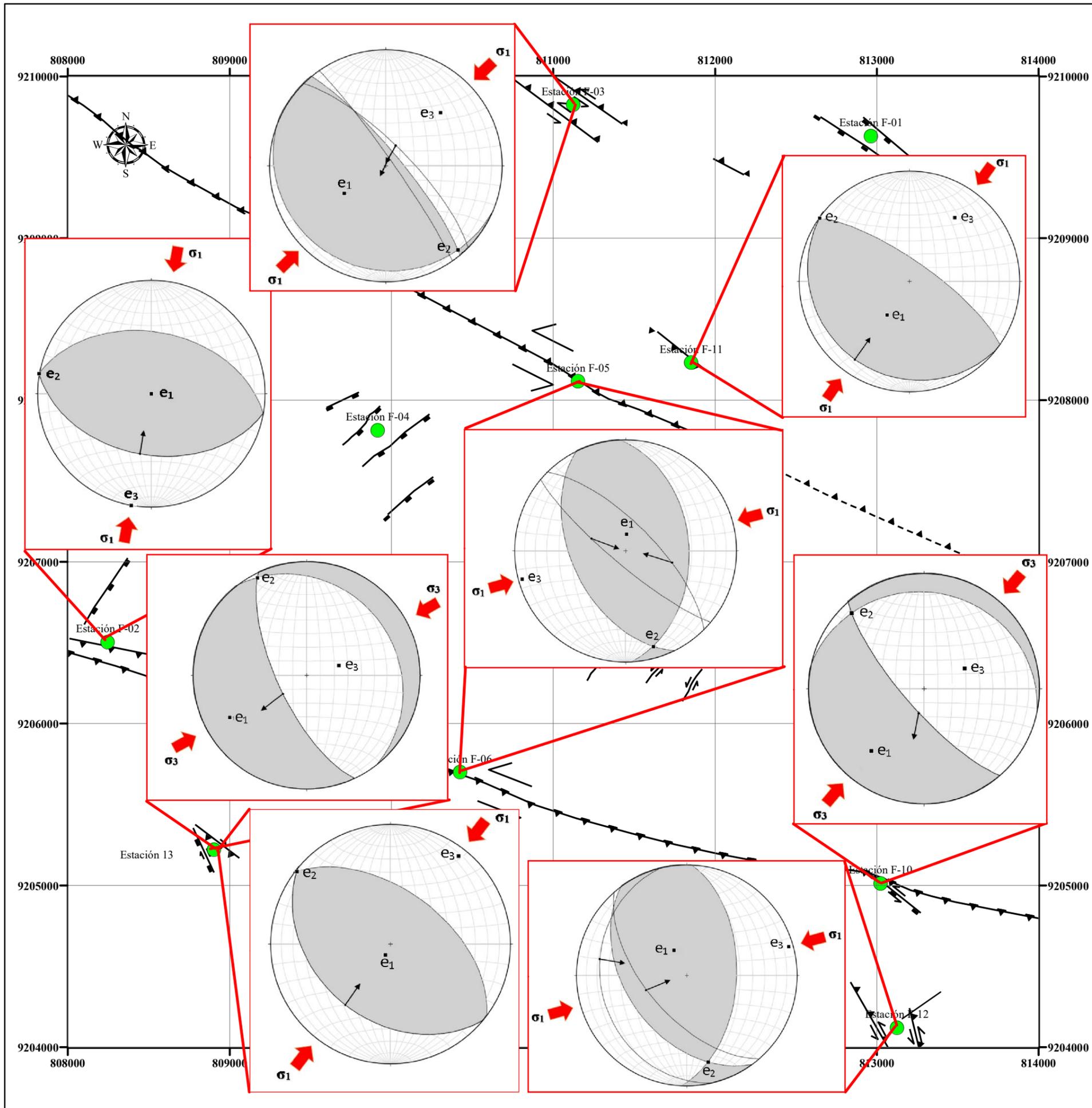
LEYENDA	
	Estaciones
	Camino de herradura
	Trocha carrozable
	Carretera afirmada
	Falla Inversa
	Falla normal
	Falla inversa sinistral
	Falla inversa dextral
	Falla inversa sinistral inferida
	Falla normal sinistral
	Falla normal dextral
	Falla sinistral
	Pliegue sinclinal volcado
	Pliegue sinclinal volcado inferido
	Pliegue anticlinal asimétrico
	Pliegue sinclinal asimétrico
	Área de investigación

Sistema de coordenadas: WGS 1984 UTM Zone 17S
 Proyección: Transverse Mercator
 Datum: WGS 1984
 Zona: 17 Sur
 Unidad: Metros

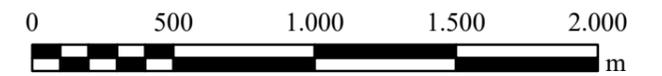
 UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA		PLANO N°: 08	
TÍTULO:	PLANO DE POLOS DE DIACLASAS		
TESISTA:	BACH. LUIS GONZALO LOZANO LAMADRID		
ASESOR:	DR. ALEJANDRO CLAUDIO LAGOS MANRIQUE		
ESCALA:	1 : 25,000	FECHA:	06/11/2021



ANÁLISIS DE FALLAS POR DIEDROS RECTOS



LEYENDA	
	Estaciones de fallas
	Falla Inversa
	Falla normal
	Falla inversa sinistral
	Falla inversa dextral
	Falla inversa sinistral inferida
	Falla normal sinistral
	Falla normal dextral
	Falla sinistral

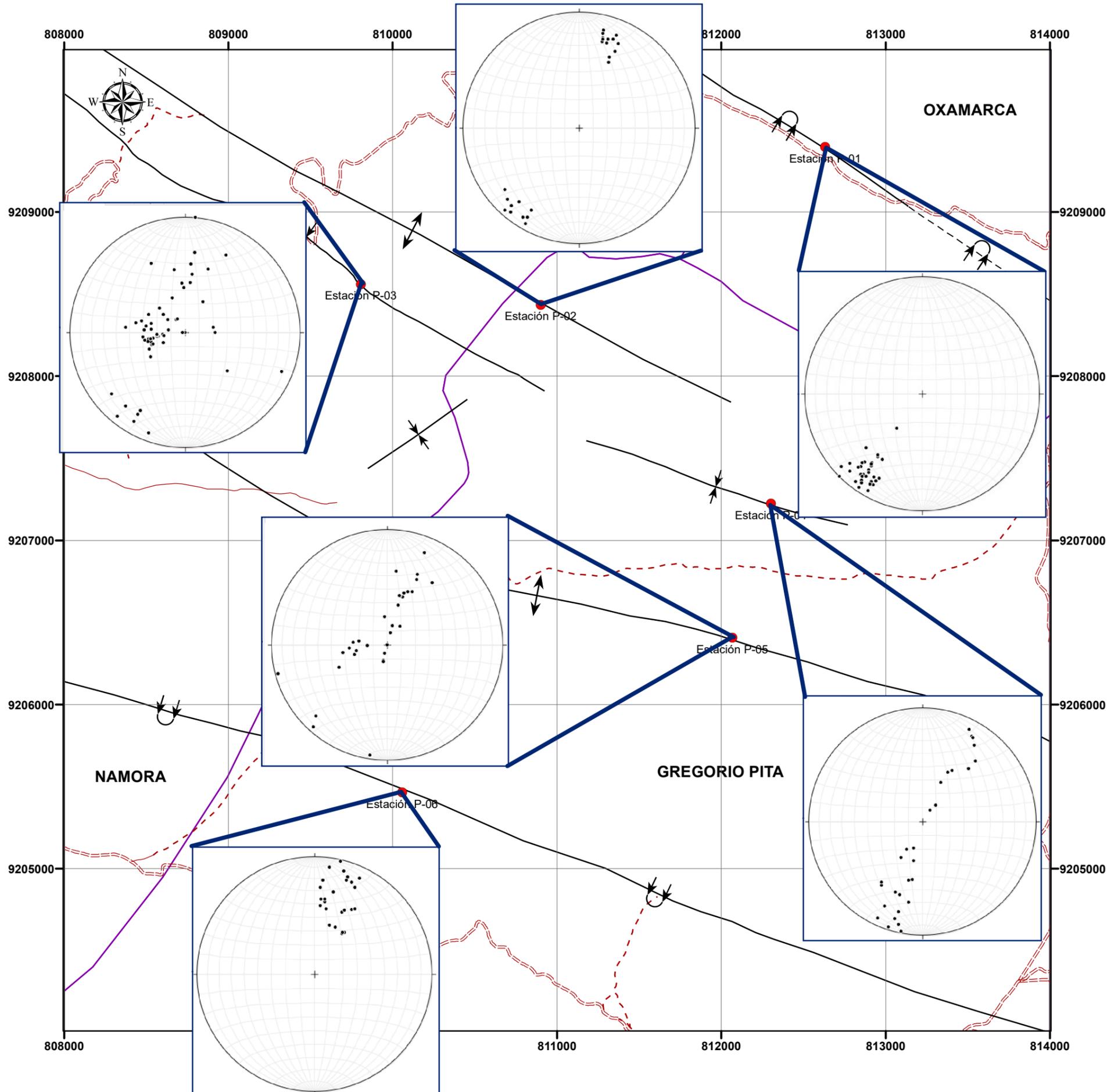


1:25.000

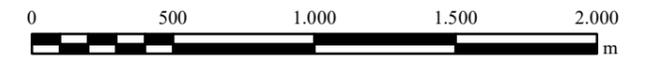
Sistema de coordenadas: WGS 1984 UTM Zone 17S
 Proyección: Transverse Mercator
 Datum: WGS 1984
 Zona: 17 Sur
 Unidad: Metros

 UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA 		PLANO N°: 09	
TÍTULO:	PLANO DE LA CINEMÁTICA DE FALLAS		
TESISTA:	BACH. LUIS GONZALO LOZANO LAMADRID		
ASESOR:	DR. ALEJANDRO CLAUDIO LAGOS MANRIQUE		
ESCALA:	1 : 25 000	FECHA:	06/11/2021

POLOS DE LOS ESTRATOS DE PLIEGUES



LEYENDA	
●	Estaciones
- - -	Camino de herradura
—	Trocha carrozable
= = =	Carretera afirmada
	Pliegue sinclinal volcado
	Pliegue sinclinal volcado inferido
	Pliegue anticlinal asimétrico
	Pliegue sinclinal asimétrico
	Distrito

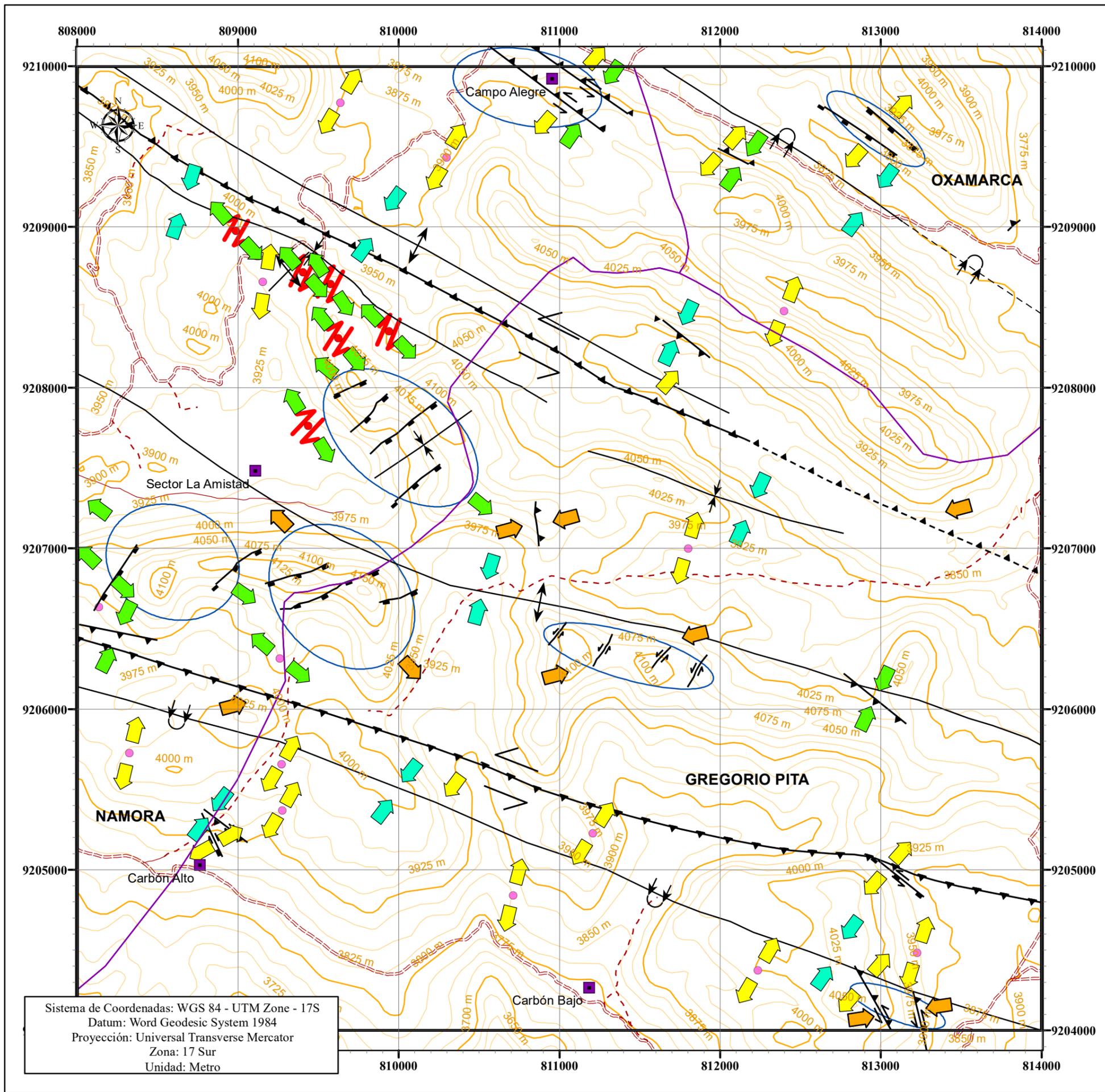


1:25.000

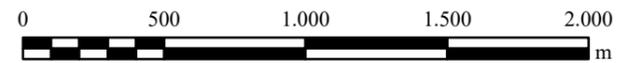
Sistema de coordenadas: WGS 1984 UTM Zone 17S
 Proyección: Transverse Mercator
 Datum: WGS 1984
 Zona: 17 Sur
 Unidad: Metros

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA		
TÍTULO:	POLOS DE LOS ESTRATOS DE PLIEGUES	PLANO N°: 10
TESISTA:	BACH. LUIS GONZALO LOZANO LAMADRID	
ASESOR:	DR. ALEJANDRO CLAUDIO LAGOS MANRIQUE	
ESCALA:	1 : 25 000	
		FECHA: 06/11/2021

PLANO CINEMÁTICO ESTRUCTURAL



LEYENDA	
	Caserios
	Fracturas extensionales en echelón
	Fracturas extensionales
	Curvas de nivel mayores (cada 100 m)
	Curvas de nivel menores (cada 25 m)
	Camino de herradura
	Trocha carrozable
	Carretera afirmada
	Falla Inversa
	Falla normal
	Falla inversa sinistral
	Falla inversa dextral
	Falla inversa sinistral inferida
	Falla normal sinistral
	Falla normal dextral
	Falla sinistral
	Pliegue sinclinal volcado
	Pliegue sinclinal volcado inferido
	Pliegue anticlinal asimétrico
	Pliegue sinclinal asimétrico
	Zona de cizalla
	Distrito
	Cinemática del primer evento tectónico
	Cinemática del segundo evento tectónico
	Cinemática del tercer evento tectónico
	Cinemática del cuarto evento tectónico



1:25.000

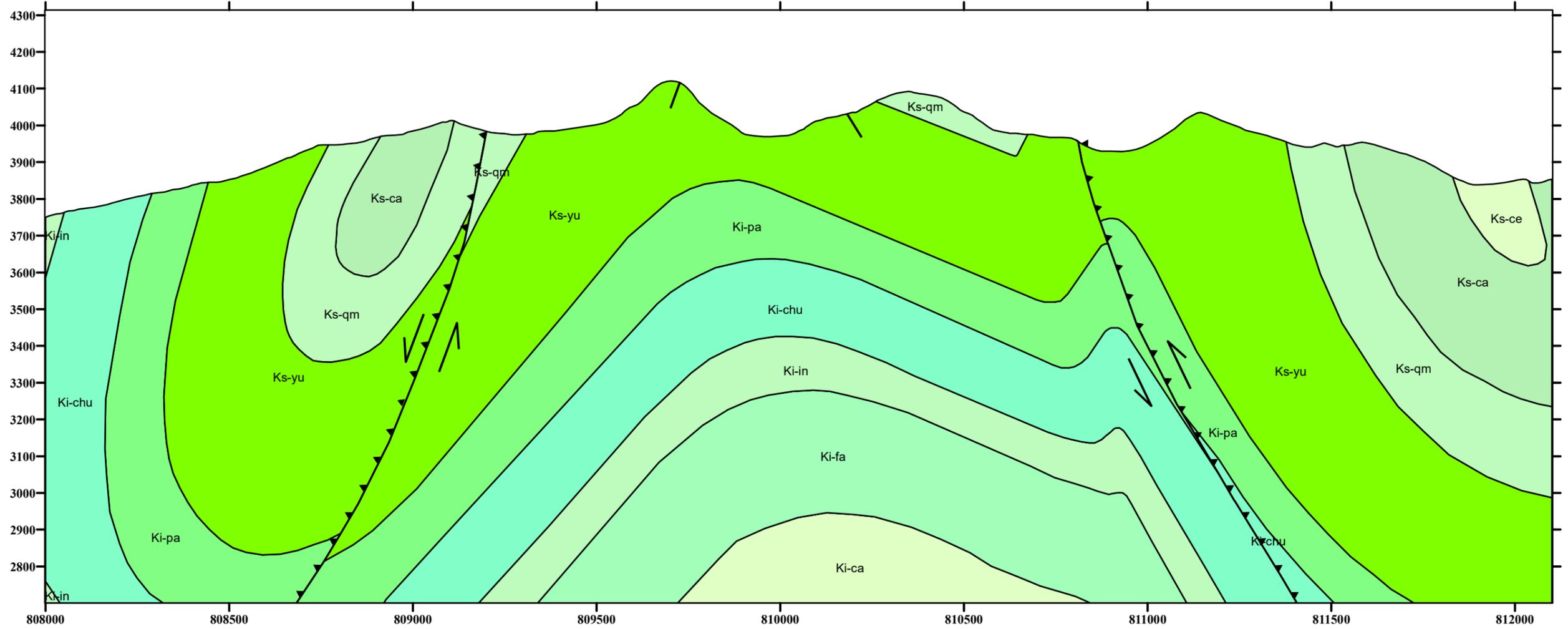
Sistema de Coordenadas: WGS 84 - UTM Zone - 17S
 Datum: World Geodesic System 1984
 Proyección: Universal Transverse Mercator
 Zona: 17 Sur
 Unidad: Metro

 UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA		PLANO N°: 11
TÍTULO:	PLANO CINEMÁTICO ESTRUCTURAL	
TESISTA:	BACH. LUIS GONZALO LOZANO LAMADRID	
ASESOR:	DR. ALEJANDRO CLAUDIO LAGOS MANRIQUE	
ESCALA:	1 : 25,000	FECHA: 06/11/2021

PERFIL GEOLÓGICO AA'

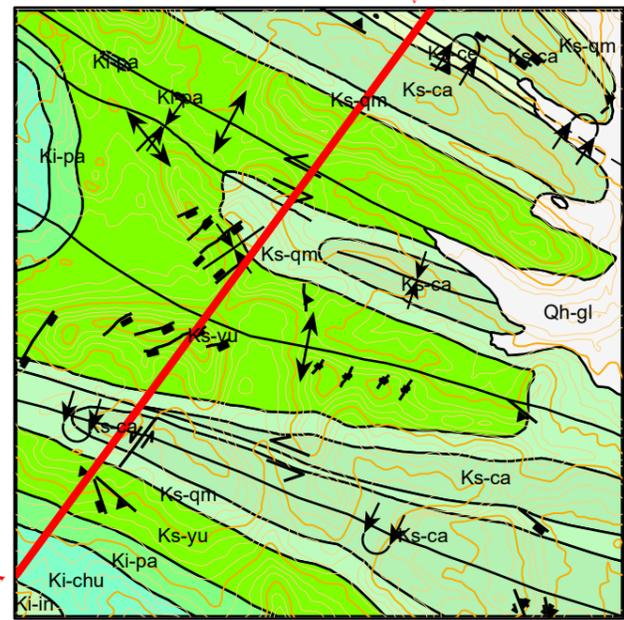
SW

NE



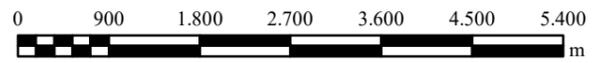
A

A'



LEYENDA	
	Ks-ca Formación Cajamarca
	Ks-qm Formación Quilquiñan Mujarrum
	Ks-yu Formación Yumagual
	Ki-pa Formación Pariatambo
	Ki-chu Formación Chúlec
	Ki-in Formación Inca
	Ki-fa Formación Farrat
	Ki-ca Formación Carhuaz
	Falla normal
	Falla inversa sinistral
	Línea de perfil AA'

ESCALA HORIZONTAL

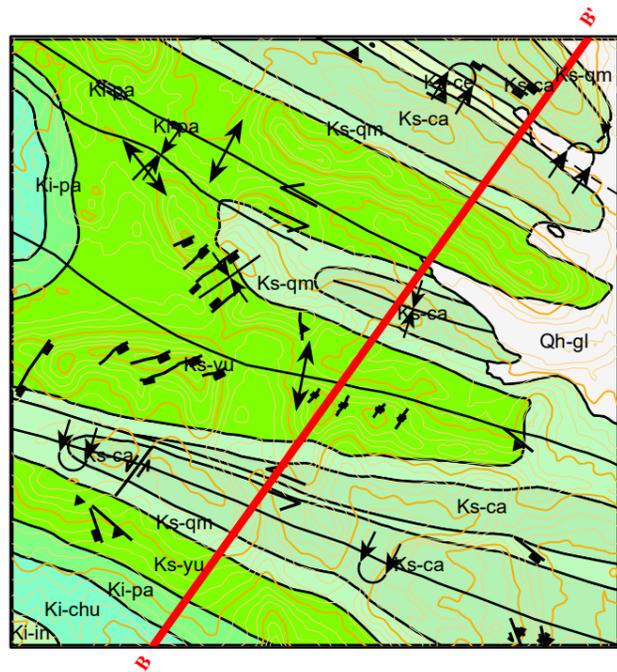
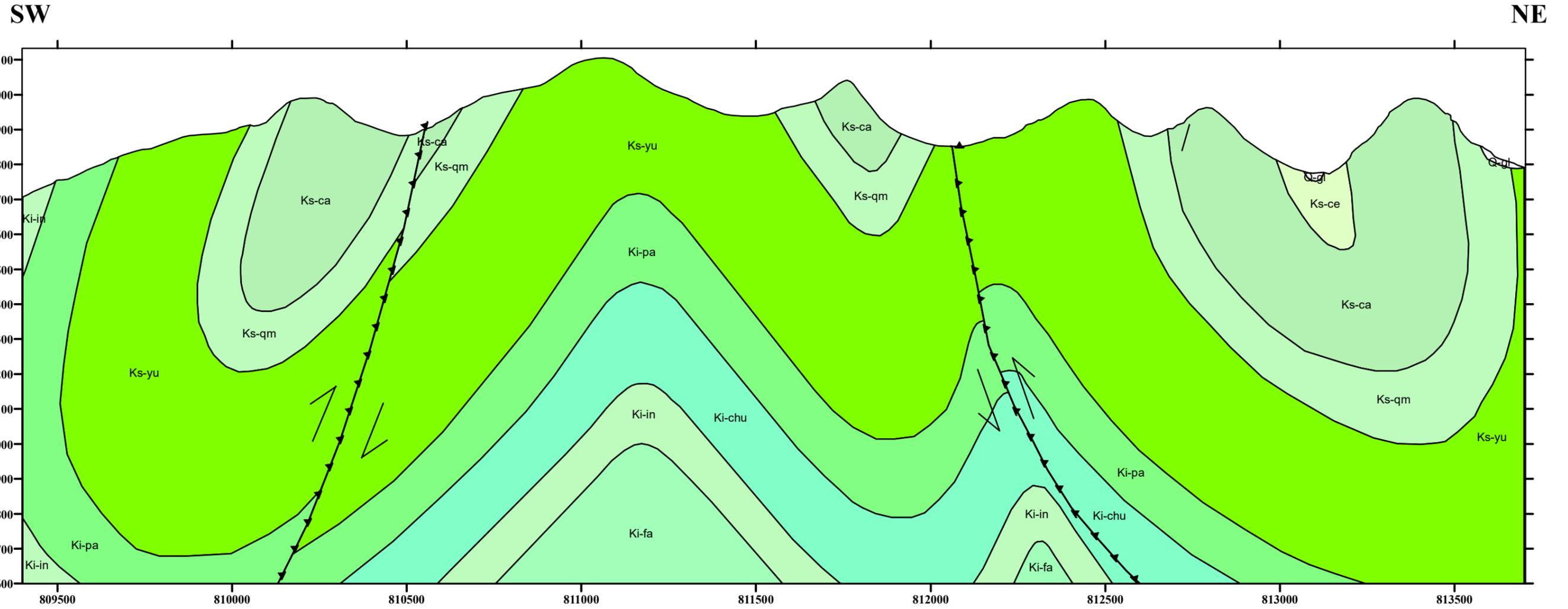


1:12.000

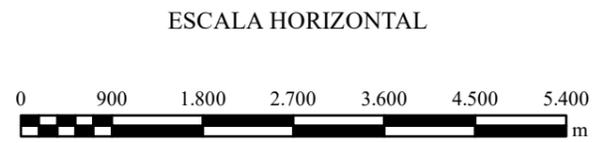
Sistema de Coordenadas: WGS 84 - UTM Zone - 17S
 Datum: Word Geodesic System 1984
 Proyección: Universal Transverse Mercator
 Zona: 17 Sur
 Unidad: Metro

 UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA		PLANO N°: 12
TÍTULO:	PERFIL GEOLÓGICO AA'	
TESISTA:	BACH. LUIS GONZALO LOZANO LAMADRID	
ASESOR:	DR. ALEJANDRO CLAUDIO LAGOS MANRIQUE	
ESCALA:	HORIZONTAL: 1 : 12,000 VERTICAL: 1 : 6000	FECHA: 04/11/2021

PERFIL GEOLÓGICO BB'



LEYENDA	
Q-gl	Depósito glaciar
Ks-ca	Formación Cajamarca
Ks-qm	Formación Quilquiñan Mujarrum
Ks-yu	Formación Yumagual
Ki-pa	Formación Pariatambo
Ki-chu	Formación Chúlec
Ki-in	Formación Inca
Ki-fa	Formación Farrat
—	Falla normal
▲	Falla inversa sinistral
—	Línea de perfil BB'



1:12.000

Sistema de Coordenadas: WGS 84 - UTM Zone - 17S
 Datum: Word Geodesic System 1984
 Proyección: Universal Transverse Mercator
 Zona: 17 Sur
 Unidad: Metro

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA		
TÍTULO:	PERFIL GEOLÓGICO BB'	PLANO N°: 13
TESISTA:	BACH. LUIS GONZALO LOZANO LAMADRID	
ASESOR:	DR. ALEJANDRO CLAUDIO LAGOS MANRIQUE	
ESCALA:	HORIZONTAL: 1 : 12,000 VERTICAL: 1 : 6000	FECHA: 04/11/2021