Universidad Nacional Mayor De San Marcos
Universidad del Perú, Decana de América
Facultad de Ciencias Físicas
Escuela Profesional de Física

Análisis de imágenes satelitales para la identificación y determinación de variación espacial de deslizamientos de tierra en la ciudad de Huancabamba, Piura, para el periodo 2017 – 2019

TESIS

Para optar el Título Profesional de Licenciado en Física

AUTOR

Joel Telmo ALAYO ONTÓN

ASESORES

Dr. Juan Carlos VILLEGAS LANZA

Mg. Octavio FASHÉ RAYMUNDO (Coasesor)

Lima, Perú

2021



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

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

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

Referencia bibliográfica

Alayo, J. (2021). *Análisis de imágenes satelitales para la identificación y determinación de variación espacial de deslizamientos de tierra en la ciudad de Huancabamba, Piura, para el periodo 2017 – 2019*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ciencias Físicas, Escuela Profesional de Física]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.

Metadatos complementarios

Datos de autor	
Nombres y apellidos	Joel Telmo Alayo Ontón
DNI	71402339
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0002-9642-1680
Datos de asesor	
Nombres y apellidos	Juan Carlos Villegas Lanza
DNI	41574717
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0002-2772-1508
Datos de coasesor	
Nombres y apellidos	Octavio Fashé Raymundo
DNI	10351868
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0002-6743-7800
Datos de investigación	
Línea de investigación	A.2.3.1. Procesamiento de Imágenes Satelitales y Modelado.
Grupo de investigación	Ciencias de la Tierra, Clima y Medio Ambiente - CTCLIMA
Agencia de financiamiento	Perú. Instituto Geofísico del Perú (IGP) - Fondo Nacional de Desarrollo Científico, Tecnológico y de Innovación Tecnológica (FONDECYT). 166-2017.
Ubicación geográfica de la investigación	Ciudad de Huancabamba País: Perú Departamento: Piura Provincia: Huancabamba Distrito: Huancabamba Latitud: -5.238629 Longitud: -79.450459 Instituto Geofísico del Perú (IGP) País: Perú Departamento: Lima Provincia: Lima

	Distrito: La Molina Calle: Calatrava 216, La Molina 15023 Latitud: -12.069625 Longitud: -76.966359
Año o rango de años en que se realizó la investigación	Diciembre 2019 - diciembre 2020
URL de disciplinas OCDE	Geociencias, Multidisciplinar https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#1.05.01 Geoquímica, Geofísica https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#1.05.04

Universidad Nacional Mayor de San Marcos
Universidad del Perú. Decana de América

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS

ESCUELA PROFESIONAL DE FÍSICA

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE LICENCIADO EN FÍSICA

Siendo las 16:00 horas del martes 25 de mayo del 2021, en la Sala de Sesión Virtual de la Facultad de Ciencias Físicas, bajo la Presidencia del Mg. Juan Neil Mendoza Nolorbe, el Lic. José Carlos Eche Llenque (Miembro), el Mg. Octavio Fashé Raymundo (Co-asesor), el Ing. Fernando Mestanza Hérnandez (Suplente), y el Dr. Juan Carlos Villegas Lanza (Asesor) invitado para participar con voz pero sin voto, se dio inicio a la Sesión Pública de Sustentación de Tesis para optar el Título Profesional de Licenciado en Física, del Bachiller:

Joel Telmo Alayo Ontón

El Presidente del Jurado en primer lugar dio lectura al documento formal que designa al Jurado y aprueba el acto de sustentación de la Tesis, así como el Resumen del Expediente e invitó al citado Bachiller a realizar la presentación y exposición de su Tesis:

"Análisis de imágenes satelitales para la identificación y determinación de variación espacial de deslizamientos de tierra en la ciudad de Huancabamba, Piura, para el periodo 2017 – 2019"

Concluida la exposición del candidato y luego de las preguntas de rigor por parte del Jurado, el Presidente del Jurado con el apoyo de la Unidad de Informática, invitó al Bachiller y al público a abandonar momentáneamente la Sala de Sesión Virtual, para dar paso a la deliberación y calificación por parte del Jurado.

Al término de la deliberación del Jurado el Mg. Juan Neil Mendoza Nolorbe invitó al candidato y al público en general a pasar a la Sala de Sesión Virtual, para dar lectura al Acta de Calificación, en cuyo contenido se ha registrado la nota obtenida por el bachiller, la misma que ha sido de:

18	Dieciocho	HONROSA
.....	.....	.....
(NÚMERO)	(LETRAS)	(MENCIÓN)

Habiendo concluido la Sustentación de la Tesis, el Presidente del Jurado, remitirá el Acta al Vicedecano Académico de la Facultad de Ciencias Físicas, quien la suscribirá dando fe de la realización del acto virtual de manera remota.

El Acta de Calificación será remitida al Director de la Escuela Profesional de Física quien a su vez solicitará la aprobación del Consejo de Facultad para el otorgamiento del Título Profesional de Licenciado en Física al Bachiller Joel Telmo Alayo Ontón.

Universidad Nacional Mayor de San Marcos
Universidad del Perú. Decana de América

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS

ESCUELA PROFESIONAL DE FÍSICA

Siendo las 17:30 horas, se dio por concluido el acto académico, expidiéndose tres (03) Actas originales de la Sustentación de la Tesis.

Ciudad Universitaria, 25 de mayo de 2021.

Mg. Juan Neil Mendoza Nolorbe
PRESIDENTE

Lic. José Carlos Eche Llenque
MIEMBRO

Mg. Octavio Fashé Raymundo
CO-ASESOR

Ing. Fernando Mestanza Hérnandez
SUPLENTE

UNMSM
Firmado digitalmente por ROJAS ACUÑA Joel FAU 20148092282 soft
Motivo: Soy el autor del documento
Fecha: 03.06.2021 16:42:59 -05:00

Dr. Joel Rojas Acuña
VICEDECANO ACADÉMICO - FCF

Datos de la plataforma virtual institucional del acto de sustentación:

Enlace:

https://zoom.us/j/94006508040?pwd=K2pya1lrT2g5ZW4yY24xM0hCcE91Zz09

ID de reunión: 940 0650 8040

Código de acceso: 103997

Grabación archivada en: https://fb.watch/5TYsEOf2Hh/

DEDICATORIA

A Cristina, Telmo y Joanna, por el constante apoyo a través de los años, por su confianza y la infinita paciencia que me brindan. Siempre están ahí para escucharme y aconsejarme en las decisiones que me han ayudado a nunca dejar atrás mis mayores propósitos en la vida.

A todas aquellas personas que de alguna forma influyeron y ayudaron en el desarrollo de esta investigación científica, ya que sin ustedes no habría encontrado el camino correcto para culminar un trabajo de tal magnitud

A todos aquellos que empiezan a incursionar en el mundo de ciencia. Nunca se rindan y busquen las respuestas a la más mínima conjetura que tengan, ya que en el mundo científico las preguntas nunca faltarán, pero las respuestas sí.

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por mostrarme la infinita vastedad del universo y las leyes que lo rigen, y que me ha llevado a seguir el camino de la ciencia y me brinda los conocimientos suficientes para su entendimiento.

A mis padres, Cristina Ontón Cahuana y Telmo Alayo Rodríguez, quienes, con su interminable apoyo, paciencia y comprensión, permitieron el desarrollo del presente trabajo de investigación y en general de toda mi formación profesional.

A la Facultad de Ciencias Físicas de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos (UNMSM), por formarme profesionalmente y brindarme a través de los años, conocimientos para desenvolverme en el mundo de la Física y en general de todas las ciencias. Al Instituto Geofísico del Perú (IGP) por brindarme la oportunidad de desarrollarme profesionalmente y ofrecerme el apoyo y el ambiente adecuado para el desarrollo de la presente investigación.

Al convenio 166-2017 FONDECYT del proyecto ejecutado por el IGP y denominado: *Evaluación geodinámica, geofísica y geológica de los deslizamientos de tierra que afectan la seguridad física de la ciudad Huancabamba (Piura)*, cofinanciado por el FONDECYT e IGP, dentro del cual se desarrolló la presente tesis.

A mi asesor Dr. Juan Carlos Villegas Lanza y coasesor Mg. Octavio Fashé Raymundo, por su gran ayuda, sus recomendaciones, paciencia y tiempo brindado para el inicio, desarrollo y culminación de este trabajo de investigación.

A mis compañeros investigadores de la unidad de Geodesia Espacial del IGP: Wendy, Rocío, Keiko, Rodrigo y Mijaell, quienes, a través del tiempo, me ofrecieron constantes consejos que me ayudaron a mejorar y completar este trabajo de investigación. Así mismo, también mostrar mi gratitud al Ing. Juan Carlos Gómez Ávalos por su apoyo inicial para la presente investigación.

Al Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI) por brindar los datos meteorológicos a través de su página web, a la Comisión Nacional de Investigación y Desarrollo Aeroespacial (CONIDA) y al Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) por proporcionar las imágenes satelitales y al Instituto Tecnológico de California (CALTECH) por proveer el software COSI-Corr.

En general, a mis amistades de la universidad y todas las personas que me brindaron su incondicional apoyo.

¡Muchas Gracias!

Contenido

Índice de figuras 4
Índice de Tablas 10
Resumen 11
Capítulo 1 13
Introducción 13
1.1 Introducción 13
1.2 Antecedentes 15
1.3 Objetivos 19
1.3.1 General 19
1.3.2 Específicos 19
1.4 Planteamiento del problema 19
1.5 Justificación del problema 20
1.6 Área de estudio 20
1.7 Clima 22
1.8 Generalidades meteorológicas 22
1.9 Sismicidad entre 2017 y 2019 23
Capítulo 2 25
Marco Teórico 25
2.1 Generalidades de la Teledetección 25
2.1.1 Magnitudes radiométricas básicas 26
2.1.2 Espectro Electromagnético 27
2.1.3 Datos raster 28
2.1.4 Formatos de almacenamiento 30
2.1.5 Sensores, plataformas y tipos de resolución 32
2.2 Correlación de Imágenes Digitales 33
2.2.1 Deformación de subconjuntos 34
2.2.2 Transformadas de Fourier (TF) 36
2.2.2.1 Transformada Discreta de Fourier (TDF) 36
2.2.2.2 Transformada Rápida de Fourier (TRF) 37
2.2.2.3 Transformada Rápida de Fourier bidimensional 39
2.2.3 Correlación Cruzada (CC) 39
2.2.4 Aplicación a deslizamientos 41

2.2.5 Principales limitaciones 42
2.3 Procesos de remoción de masa 42
2.3.1 Principales detonantes 43
2.3.2 Principales tipos de movimientos de masa 44
2.3.3 Clasificación basada en velocidades 48
Capítulo 3 49
Marco Metodológico 49
3.1 Descripción general 49
3.2 Adquisición de imágenes satelitales 50
3.2.1 Características de imágenes Sentinel 2A y 2B 52
3.2.2 Características de imágenes SPOT 6 53
3.2.3 Uso de DEM o DTM y DSM 54
3.3 Preprocesamiento de imágenes 57
3.4 Corregistro y ortorrectificación 58
3.5 Correlación subpíxel 60
3.5.1 Correlación estadística 60
3.5.2 Correlación por frecuencia 61
3.5.3 Parámetros de correlación 62
3.6 Estimación de desplazamientos resultantes 64
3.7 Campo vectorial de desplazamiento 64
3.8 Interpolación de resultados 65
3.9 Estimación del RMSE 67
Capítulo 4 68
Resultados 68
4.1 Ensayos previos para descarte de imágenes 68
4.2 Pruebas de correlación subpíxel 69
4.3 Salidas iniciales 73
4.4 Prueba NQ1 74
4.4.1 Desplazamientos horizontales E-W 74
4.4.2 Desplazamientos horizontales N-S 79
4.4.3 Desplazamientos Resultantes 83
4.5 Prueba NP12 87
4.5.1 Falsos desplazamientos 87

4.5.2 Desplazamientos horizontales E-W 89
4.5.3 Desplazamientos horizontales N-S 91
4.5.4 Desplazamientos Resultantes 94
4.6 Determinación del tipo de movimiento en masa 98
4.7 Alcance de los movimientos de masa 102
4.8 Análisis entre magnitudes de desplazamientos 103
4.9 Correlatividad entre desplazamientos, precipitación y sismicidad 107
Capítulo 5 116
Análisis y discusión de resultados 116
5.1 Prueba NQ1 116
5.1.1 Campo Vectorial de desplazamientos y estimación de velocidades 116
5.1.2 Correlatividad de desplazamientos y pendientes 119
5.2 Prueba NP12 121
5.2.1 Campo vectorial de desplazamientos y estimación de velocidades 121
5.2.2 Correlatividad de desplazamientos y pendientes 125
Capítulo 6 150
Conclusiones 150
Bibliografía 153
Apéndice A: Mapa de elevaciones 156
Apéndice B: Mapa de pendientes 157
Apéndice C: Mapa de Orientación de pendientes 158
Apéndice D: Estudio Geodésico 159
Apéndice E: Mapa urbano de la ciudad de Huancabamba 160
Apéndice F: Malla de puntos 161
Apéndice G: Comparación de resultados de Maca 162
Apéndice H: Tabla de sismos 163

Índice de figuras

Figura 1.Mapa de ubicación del área de estudio (polígono rojo). La ciudad de Huancabamba se encuentra al margen derecho del rio Huancabamba, entre los cerros Huititingun y Colorado. 21
Figura 2. Precipitación acumulada mensual de los años 2017, 2018 y 2019. Fuente: SENAMHI. 23
Figura 3. Distribución espacial de los sismos identificados. Los puntos verdes representan los sismos de magnitudes entre 4.4 a 4.9, los puntos amarillos son los sismos de magnitudes entre 5.0 y 5.5, los puntos de color naranja representan los sismos mayores a 6.0 y los puntos rojos, los sismos de magnitud Mw de 7.5 y 8.0. Están en dos radios de búsqueda de 300 Km para sismos ≥ Mw 4.4 (circulo celeste) y 600 Km para sismos ≥ Mw 6.0 (círculo rojo), con centro en la ciudad de Huancabamba (punto azul). Fuente: Google Earth. 24
Figura 4. Espectro Electromagnético. Adaptado de Baghdadi & Zribi (2016). 28
Figura 5. Arreglo de pixeles en matriz de L filas y P columnas. El pixel con ubicación (i, j), contiene el numero digital 68. Adaptado de Ose et al (2016). 28
Figura 6. Sección de una imagen pancromática SPOT 6. El valor de un píxel corresponde a un porcentaje de nivel de gris entre el negro (0) y el blanco (255). 29
Figura 7. Representación de una imagen multiespectral, donde las matrices apiladas y superpuestas en forma de planos contienen la información que componen sus diferentes bandas. El pixel P (i, j) es un vector cuyos componentes son P1 (i, j), P2 (i, j), P3 (i, j), … P_N (i, j), cuyos valores de los píxeles están en las bandas 1 a N. Adaptado de Ose et al (2016). 30
Figura 8. Diferentes formas de almacenamiento de pixeles y bandas de datos raster (Ose et al., 2016). 31
Figura 9. Esquema básico del principio de correlación de imágenes digitales. a) El patrón de moteado presente en el subconjunto de referencia de la imagen principal (cuadro verde), es determinado en su forma distorsionada en b) la imagen secundaria, delimitado por el cuadro rojo del subconjunto deformado. La separación entre ambos subconjuntos determina un vector que proporciona información de propagación y dirección del proceso de deformación. Los puntos verde y anaranjado representan respectivamente al punto central (P) del subconjunto de referencia y a puntos referenciales. Adaptado de Caporossi & Mazzanti (2018). 34
Figura 10. Resultados del estudio sobre desplazamiento superficial del glaciar Lirung obtenidos por Meijer (2015), donde se aplica la TRF a una función monodimensional. a) Se presenta los valores de una línea de píxeles (N = 1000) del glaciar, con el tamaño del intervalo de frecuencia de $2\pi/N$. b) Esto se calcula con un algoritmo de TRF en un espectro logarítmico. Mientras que la inversa de la Transformada Rápida de Fourier (iTRF) calcula el dominio espacial original. Adaptado de Meijer (2015). 38
Figura 11. Secciones de dos imágenes digitales Sentinel 2 (21/06/2018 y 01/07/2018), que fueron correlacionadas y el resultado es la sección central, en donde se observa distorsiones causadas por la presencia de grandes sombras y nubosidad (polígonos rojo, amarillo y verde). 42
Figura 12. Caídas de rocas (Highland & Bobrowsky, 2008). 45
Figura 13. Desprendimientos (Highland & Bobrowsky, 2008). 45
Figura 14. Deslizamiento Rotacional (Highland & Bobrowsky, 2008). 46
Figura 15. Deslizamiento Traslacional. Adaptado de Highland & Bobrowsky (2008). 47
Figura 16. Reptación de suelo (Suarez, 1998). 47
Figura 17. Zonas de adquisición de las imágenes satelitales. El polígono de color morado representa el área de estudio, mientras que el cuadro de color amarillo el área que cubren todas las imágenes descargadas de distintas fechas adquiridas por la plataforma Sentinel 2 y los cuadros de color azul y rojo representan las áreas cubiertas por las imágenes de la plataforma SPOT 6, perteneciente a las fechas de 14/07/2019 y 03/07/2019, respectivamente. 52

Figura 18. Zona de adquisición del ASTER DEM. El pequeño polígono morado representa el área de estudio, mientras que el cuadro de color celeste representa la extensión superficial del DEM, con área aproximada de 12234 Km^2 y perímetro de 442 Km. 55
Figura 19. Ejemplo de la diferencia visual entre un Modelo Digital de Terreno (DTM) y un Modelo Digital de superficie (DSM). Principalmente en una de ellas se denota las edificaciones y vegetación presente en la superficie terrestre (GISResources, 2013). 56
Figura 20. Diagrama de flujo de los procesos para la obtención de imágenes ortorrectificadas. Adaptado de CALTECH (2004). 60
Figura 21. Esquema del proceso de correlación estadística, en donde se compara los coeficientes de correlación de la ventana principal y secundaria. Esto ocurre dentro de un rango de búsqueda en la imagen secundaria. La posición de la siguiente ventana está determinada por el tamaño del paso. Adaptado de Meijer (2015) 61
Figura 22. Proceso de correlación por frecuencia, en donde se calcula la Transformación Rápida de Fourier (TRF) bidimensional a partir de las ventanas iniciales en la imagen principal y secundaria, dando como resultado un desplazamiento en la escala de píxeles. Mientras que los desplazamientos a escala subpíxel son estimados a partir del barrido de ventana TRF final dentro de la Ventana TRF inicial. Adaptado de Meijer (2015) 62
Figura 23. Diagrama de flujo de trabajo que muestra los principales procesos y parámetros utilizados por el software COSI-Corr. Adaptado de Yaseen (2009). 63
Figura 24. Ejemplo de archivo de texto con los resultados de la correlación S32x32_s16_T90. 65
Figura 25. Estimación del valor de puntos con el interpolador Kriging. 66
Figura 26. Estimaciones de la RMSE de todas las pruebas de correlación subpíxel. Las pruebas NP1, NP6 y NP11, presentan valores muy elevados, lo cual llevó a sus descartes inmediatos para el análisis posterior de sus resultados. 70
Figura 27. Esquema de la distribución temporal de las pruebas. Las líneas negras de trazo representan las separaciones anuales. La flecha de color azul abarca toda la extensión temporal de estudio con sus respectivas fechas para cada imagen usada, solo las flechas en rojo representan las pruebas que abarcan distintos años (2017, 2018 y 2019), mientras que la flechas celestes, naranjas y moradas representan las pruebas realizadas en años únicos, sin abarcar otros años y la flecha verde muestra la extensión temporal de las pruebas solo con imágenes SPOT 6, a diferencia del resto que fueron realizadas con imágenes Sentinel 2. Los cuadros amarillos muestran las ubicaciones temporales de las campañas GPS. 72
Figura 28. Resultados del proceso de correlación de la Prueba NQ1 con patrones de moteado disperso en la totalidad de las imágenes. a) Composición RGB de las tres bandas. b) La banda 1 contiene los desplazamientos horizontales este–oeste (E-W), mientras que c) la banda 2, los desplazamientos norte-sur (N-S) de las deformaciones superficiales terrestres. d) Representación gráfica de la tercera banda, en donde se encuentran los datos de la relación señal/ruido (SNR). 73
Figura 29. Mapa de desplazamientos horizontales este-oeste, en la ciudad de Huancabamba. 76
Figura 30. Mapa de desplazamientos horizontales Este-Oeste en toda el área de estudio. 78
Figura 31. Mapa de desplazamientos horizontales norte-sur en la ciudad de Huancabamba 80
Figura 32. Mapa de desplazamientos horizontales Norte-Sur en toda el área de estudio. 82
Figura 33. Mapa de desplazamientos resultante obtenidos mediante el procesamiento de imágenes SPOT 6 para el periodo 2017-2019, en la ciudad de la ciudad de Huancabamba y alrededores. 84
Figura 34. Mapa de desplazamientos resultantes. 86
Figura 35. Secciones de las imágenes Sentinel 2 usadas en la prueba de correlación subpíxel NP12. Los polígonos rojo, verde y azul representan respectivamente el área total de estudio, grandes sombras y nubes encontradas al norte y sur de la ciudad de Huancabamba. La diferencia de contraste en las imágenes se debe a que ambas fueron tomadas en diferentes horas del día. 88
Figura 36. Mapa de desplazamientos horizontales Este-Oeste de la prueba NP12. Se muestran las 6 principales zonas de mayor deformación superficial con dirección de desplazamiento preferencial

hacia el este, en tonos rojizos y delimitadas por líneas negras entrecortadas. Estas zonas presentan magnitudes desde ~ 0.80 m hasta ~ 1.0 m, mientras que las zonas en tonos azules representan las regiones las zonas con dirección preferencial hacia el oeste y sus magnitudes varían desde cero (zonas estables) hasta los 0.40 m. 90
Figura 37. Mapa de desplazamientos horizontales Norte--Sur de la prueba NP12. Se muestran las 11 principales zonas de mayor deformación superficial con dirección de desplazamiento preferencial hacia el norte, en tonos rojizos y delimitadas por las líneas negras entrecortadas. Estas zonas presentan magnitudes desde ~ 0.006 m hasta 0.26 m, mientras que las zonas en tonos azules representan las regiones las zonas con dirección preferencial hacia el sur y sus magnitudes varían desde cero (zonas estables) hasta los 0.50 m. 93
Figura 38. Mapa de desplazamientos resultantes de la prueba NP12. Se muestran las 11 principales zonas de mayor deformación superficial, la cuales presentan desplazamientos aproximadamente entre 0.17 m hasta 0.83 m, mientras que las zonas en tonos morados representan las regiones con menores magnitudes de desplazamientos. 97
Figura 39. Correlatividad entre las extensiones superficiales terrestres de las zonas determinadas de deslizamientos, propuestos por Córdova (2019), sobre las zonas de mayor deformación superficial de acuerdo a los resultados de las pruebas NQ1 y NP12. 100
Figura 40. Identificación de zonas con problemas de reptación de suelos en el centro urbano de Huancabamba. Las zonas delimitadas con líneas amarillas representan las extensiones de las regiones con presencia de desplazamientos. Adaptado de Villegas et al (2018). 101
Figura 41. Mapa de distribución superficial del alcance de los movimientos de masa de las pruebas NQ1 y NP12 (polígonos rojos) y del alcance de las áreas afectadas por procesos de remoción en masa, propuestos por Córdova (2019) (polígonos con rayas amarillas). 102
Figura 42. Estimaciones de desplazamientos resultantes a través de 5 pruebas de correlación subpíxel, en la distribución de 31 posiciones referenciales a las ubicaciones de estaciones GPS. Los resultados de las pruebas NQ1 y NP12, son las más cercanas a las mediciones geodésicas. 106
Figura 43. Comparación de medidas realizadas en puntos referenciales a las ubicaciones de las estaciones GPS, respecto a los resultados obtenidos de las pruebas NP1, NP6 y NP11 (de acuerdo a los 42 días de prueba), los cuales hacen referencia a la misma vez, a cuan alejados se encuentra los desplazamientos determinadas en el resto de pruebas. 107
Figura 44. Ubicación de la estación geodésica PI04 y la estación meteorológica, en la ciudad de Huancabamba. 109
Figura 45. Serie temporal de PI04 con los desplazamientos horizontales Este-Oeste (E-W). 110
Figura 46. Serie temporal de PI04 con los desplazamientos horizontales Norte-Sur (N-S). 110
Figura 47. Serie de tiempo de desplazamientos resultantes (curva verde), calculados con los datos de la estación GPS permanente (PI04). La curva celeste representa la precipitación acumulada por día y fue registrada por la estación meteorológica Huancabamba desde el comienzo de la temporada de menor precipitación (julio de 2017). 111
Figura 48. Serie de tiempo con los desplazamientos resultantes (curva verde), calculados a partir de los datos de la estación GPS permanente (PI04). La curva celeste representa la precipitación acumulada a través de los días y fue registrada por la estación meteorológica Huancabamba. 111
Figura 49. Sección de serie de tiempo de la estación PI04. Se muestra la evolución temporal de los desplazamientos estimados entre los días 17 y 24 de enero del 2018 y paralelamente las mediciones de precipitación acumulada en esos días. Las pendientes de ambas curvas se elevan desde el 19 al 20 de enero y corresponden a un aumento aproximado de 1.1 cm para curva verde (desplazamientos) y de 4.3 mm para la curva celeste (precipitación). Esta es una variación muy alta al resto, ya que los demás análisis muestran variaciones de muy bajas magnitudes (< 2 mm). 112
Figura 50. Distribución de sismos en la serie de tiempo de desplazamientos de la estación PI04 112
Figura 51. Sección de la serie de tiempo de la estación PI04 para el periodo del 14 al 24 de julio del 2017. La línea roja discontinua indica la fecha correspondiente al sismo de magnitud Mw de 5.0, ocurrido

a 298 km de la zona de estudio y a una profundidad de 64 Km. Se observa un posible desplazamiento cosísmico de 3 mm, asociado al evento sísmico ocurrido el 11 de agosto del 2017. 113
Figura 52. Sección de la serie de tiempo de la estación PI04 para el periodo del 1 al 11 de octubre del 2017. La línea roja discontinua indica la fecha correspondiente al sismo de magnitud Mw de 4.9, ocurrido a 181 km de la zona de estudio y a una profundidad de 35 Km. Se observa un posible desplazamiento cosísmico de 5 mm, asociado al evento sísmico ocurrido el 6 de octubre del 2017. 113
Figura 53. Sección de serie de tiempo de la estación PI04 para el periodo del 30 de octubre del 2017 al 9 de noviembre del 2017. La línea roja discontinua indica la fecha correspondiente al sismo de magnitud Mw de 4.5, ocurrido a 193 km de la zona de estudio y a una profundidad de 45 Km. Se observa un posible desplazamiento cosísmico de 3 mm, asociado al evento sísmico ocurrido el 4 de noviembre del 2017. 114
Figura 54. Sección de serie de tiempo de la estación PI04 del 12 al 22 de noviembre del 2017. Las líneas rojas discontinuas indican las fechas respectivas de los sismos de magnitudes Mw de 4.9 (S7), 5.5 (S8A), 4.4 (S8B) y 4.8 (S9), todos ocurridos a menos de 252 km de la zona de estudio. Se observa un posible desplazamiento cosísmico de 8 mm, asociado a los eventos sísmicos ocurridos el día 18 de noviembre del 2017. Mientras que S7 y S9 no generaron desplazamientos cosísmicos. 114
Figura 55. Sección de serie de tiempo de la estación PI04 del 25 de febrero del 2018 al 3 de marzo del 2018. La línea roja discontinua indica la fecha correspondiente a los dos sismos de magnitudes Mw de 4.9 (S18A) y 5.0 (S18B), a 261 Km y 270 Km, respectivamente de la zona de estudio. S18A se desencadeno a una profundidad de 3 Km, mientras que S18B a una profundidad de 10 Km. De acuerdo a la curva de color verde, se observa un posible desplazamiento cosísmico de 4 mm, asociado a los dos eventos sísmicos ocurridos el día 27 de febrero del 2018. 114
Figura 56. Sección de serie de tiempo de la estación PI04 del 2 al 13 de octubre del 2018. Las líneas rojas discontinuas indican las fechas respectivas de los sismos de magnitud Mw de 6.2 (S29) y Mw de 5.1 (S30). El sismo S29 se desencadeno a una profundidad de 110 Km, mientras que S30 a una profundidad de 10 Km y ambos a 330 Km y 248 Km respectivamente de la zona de estudio. Se observa un posible desplazamiento cosísmico de 4 mm solo por parte de S30. 115
Figura 57. Sección de serie de tiempo de la estación PI04 del 21 al 26 de mayo del 2019. La línea roja discontinua indica la fecha cuando ocurrió el sismo de magnitud Mw de 8.0 (S35), el cual estuvo a una profundidad de 123 Km y a 470 Km de la zona de estudio. Se observa un posible desplazamiento cosísmico de 19 mm solo por parte de S35. 115
Figura 58. Mapa de distribución del campo vectorial y las magnitudes de velocidades estimadas en mm/s correspondientes a la prueba NQ1. 117
Figura 59. Distribución de velocidades a escala de m/año, correspondientes a la prueba NQ1. 118
Figura 60. Distribución de campo vectorial sobre mapa con grados de pendientes, correspondientes a la prueba NQ1. 120
Figura 61. Distribución de campo vectorial sobre mapa con orientación de pendientes, correspondientes a la prueba NQ1. 121
Figura 62. Mapa de distribución general de los campos vectoriales de desplazamiento y las magnitudes de velocidades en unidades de $x10^{-5}$ mm/s, en las 13 zonas de mayor deformación superficial, correspondientes a la prueba NP12. 123
Figura 63. Mapa de distribución general de los campos vectoriales de desplazamientos y las magnitudes de velocidades en unidades de m/mes, en las 13 zonas determinadas de mayor deformación superficial, correspondientes a la prueba NP12. 124
Figura 64. Vista panorámica del campo vectorial de los desplazamientos resultantes en el relieve de la zona VF3 (polígono verde). Hay una notable tendencia de dirección de los vectores de desplazamiento hacia el noreste. La línea roja representa el polígono del área total de estudio. Fuente: Google Earth. 125

Figura 65. Distribución de los vectores de desplazamientos resultantes de la zona VF3, sobre secciones de mapas con a) orientaciones de pendientes, b) grado de pendientes y c) estimaciones de las velocidades de desplazamientos. 126
Figura 66. Vista panorámica del campo vectorial de los desplazamientos resultantes en el relieve de la zona VF4 y parte de VF1 (polígono verde). Hay una notable tendencia de dirección de los vectores de desplazamiento hacia el este y noreste. La línea roja representa el polígono del área total de estudio. Fuente: Google Earth.....127
Figura 67. Distribución de los vectores de desplazamientos resultantes de la zona VF4, sobre secciones de mapas de a) orientación de pendientes, b) grado de pendientes y c) estimaciones de las velocidades de desplazamientos.....128
Figura 68. Vista panorámica del campo vectorial de los desplazamientos resultantes en el relieve de la zona VF5 (polígono verde). Hay una notable tendencia de dirección de los vectores de desplazamiento hacia el este y noreste. La línea roja representa el polígono del área total de estudio. Fuente: Google Earth. 129
Figura 69. Distribución de los vectores de desplazamientos resultantes presentes en la zona VF5, sobre secciones de mapas de a) orientación de pendientes, b) grado de pendientes y c) estimaciones de las velocidades de desplazamientos. 130
Figura 70. Vista panorámica del campo vectorial de los desplazamientos resultantes en el relieve de las zonas VF6 y VF8 (polígonos verdes). Hay una notable tendencia de dirección de los vectores de desplazamiento hacia el este y noreste, en dirección de las quebradas Ungulo y Cojunda. La línea roja representa el polígono del área total de estudio. Fuente: Google Earth. 131
Figura 71. Distribución de los vectores de desplazamientos resultantes de las zonas VF6 y VF8, sobre un mapa de orientación de pendientes. Las quebradas Ungulo y Cojunda, son regiones de inflexión para dichos vectores. Mientras que la región central de zona VF6 y bordeada por esta misma, no presenta notables deformaciones superficiales debido a las grandes elevaciones del relieve presente (>2230 m.s.n.m). 132
Figura 72. Distribución de los vectores de desplazamientos resultantes presentes en la zona VF6 y VF8, sobre mapa de grado de pendientes. A pesar que los relieves con grandes elevaciones están ubicados en la parte central de la zona VF6, estos no presentan pendientes de mayor grado, sino que al contrario son muy bajas y las de mayor grado están ubicadas cerca a la quebrada Ungulo. 134
Figura 73. Mapa de distribución de los vectores de desplazamientos resultantes de la zona VF6 y VF8, sobre la disposición de las velocidades de desplazamientos respecto al tiempo de 420 días. Se aprecia una notable relación entre elevación y estimación de velocidades, ya que dentro de la zona VF6 se encuentran zonas de grandes elevaciones (>2200 m.s.n.m) donde también se estimaron velocidades de grandes magnitudes (>$2.0x10^{-5}$ mm/s).....135
Figura 74. Vista panorámica del relieve con los vectores de desplazamientos resultantes de la zona VF7 (polígono verde). Hay una notable incongruencia entre la dirección de propagación de los vectores de desplazamientos resultantes y las orientaciones de las pendientes presentes en dicha zona. La línea roja representa el polígono del área total de estudio y la de color azul el rio Huancabamba. Fuente: Google Earth.....136
Figura 75. Distribución de los vectores de desplazamientos resultantes presentes en la zona VF7, sobre secciones de mapas con a) orientación de pendientes, b) grado de pendientes y c) estimaciones de las velocidades de desplazamientos. Algunas direcciones de los vectores de la zona VF7 no concuerdan con la región donde están distribuidos, principalmente aquellos que esta dispersos en las regiones de color celeste (sur o suroeste).....137
Figura 76. Vista panorámica del campo vectorial de los desplazamientos resultantes en el relieve de la zona VF9 (polígono verde). La línea roja representa el polígono del área total de estudio y la línea azul al rio Huancabamba. Fuente: Google Earth. 138
Figura 77. Distribución de los vectores de desplazamientos en la zona VF9, sobre secciones de mapas con a) orientación de pendientes, b) grado de pendientes y c) estimaciones de las velocidades de

desplazamientos. Se aprecia una notable acumulación de vectores en la parte media de la zona VF9 con direcciones de propagación hacia el este y noreste. Esto se debe al grado de las pendientes (>15°) y las elevaciones (>2130 m.s.n.m) a la que se encuentra dicha zona. 139
Figura 78. Vista panorámica del campo vectorial de los desplazamientos resultantes en el relieve de la zona VF10 (polígono verde). La línea roja representa el polígono del área total de estudio y el polígono azul, parte del rio Huancabamba. Fuente: Google Earth. 140
Figura 79. Distribución de los vectores de desplazamientos resultantes en la zona VF10, sobre secciones de mapas de a) orientación de pendientes, b) grado de pendientes y de c) estimaciones de las velocidades de desplazamientos. Se aprecia una notable acumulación de vectores en cerca al margen izquierdo del rio Huancabamba. Esto se debe posiblemente al efecto de desgaste de la superficie terrestre por el cauce del rio, generando el avance progresivo del movimiento en masa en dicha zona. 141
Figura 80. Vista panorámica del campo vectorial de los desplazamientos resultantes en el relieve de las zonas VF6 y VF8 (polígonos verdes). Hay una notable tendencia de dirección de propagación de los vectores hacia el sur y sureste. La línea roja representa el polígono del área total de estudio. Fuente: Google Earth....142
Figura 81. Distribución de los vectores de desplazamientos resultantes en las zonas VF11 y VF12, sobre secciones de mapas de a) orientación de pendientes, b) grado de pendientes y c) estimaciones de las velocidades de desplazamientos. 143
Figura 82. Vista panorámica en relieve del campo vectorial de los desplazamientos resultantes en la zona VF13 (polígono verde). Hay una notable tendencia de dirección de los vectores de desplazamiento hacia el margen izquierdo del rio Huancabamba. La línea roja representa el polígono del área total de estudio y las celeste el rio Huancabamba. Fuente: Google Earth. 144
Figura 83. Distribución de los vectores de desplazamientos resultantes presentes en la zona VF13, sobre el mapa de orientación de pendientes a escala 1:12000. Las quebradas y el margen izquierdo del rio Huancabamba (representadas por las líneas celestes), son regiones en donde los vectores de desplazamientos tienden a dirigirse. 145
Figura 84. Distribución de los vectores de desplazamientos resultantes presentes en la zona VF13, sobre el mapa de grado de pendientes. 147
Figura 85. Distribución de los vectores de desplazamientos resultantes presentes en la zona VF13, sobre mapa de las velocidades de desplazamientos. La región que presenta menores magnitudes de velocidades (<1.0x10-5 mm/s) se encuentra al sur de VF13 y las de mayores magnitudes están ubicadas en la parte central de dicha zona (>$1.2x10^{-5}$ mm/s). 148

Índice de Tablas

Tabla 1. Delimitación del área de estudio en Sistema de Coordenadas UTM y Geográfica. 20
Tabla 2. Magnitudes radiométricas básicas relativas al campo de radiación (Sobrino et al., 2000). 27
Tabla 3. Magnitudes sísmicas necesarias para que se produzca deslizamientos de tierra. Adaptado de (Keefer, 1984). 43
Tabla 4. Activadores secundarios de deslizamientos de tierra. Adaptado de Highland & Bobrowsky (2008). 44
Tabla 5. Escala de velocidades de movimientos de masa. Adaptado de Varnes & Cruden (1996). 48
Tabla 6. Imágenes multiespectrales (MS) y pancromáticas (P) obtenidas por los sensores NAOMI y MSI en los satélites SPOT 6 y Sentinel 2 respectivamente. 51
Tabla 7. Principales características de los satélites Sentinel 2. 53
Tabla 8. Principales características del satélite SPOT-6/7. Adaptado de AIRBUS (2019). 54
Tabla 9. Datos de entrada para las correlaciones de imágenes satelitales. 71
Tabla 10. Resumen de las zonas de mayor deformación superficial terrestre con sus respectivos rangos de desplazamientos horizontales este-oeste, determinados en la prueba NQ1. 79
Tabla 11. Resumen de las zonas de mayor deformación superficial terrestre con sus respectivos rangos de desplazamientos horizontales norte-sur, determinados en la prueba NQ1 81
Tabla 12. Resumen de las zonas de mayor deformación superficial terrestre con sus respectivos rangos de desplazamientos resultantes, determinados en la prueba NQ1. 85
Tabla 13. Resumen de las zonas de mayor deformación superficial terrestre con sus respectivos rangos de desplazamientos horizontales E-W, determinados en la prueba NP12. 89
Tabla 14. Resumen de las zonas de mayor deformación superficial terrestre con sus respectivos rangos de desplazamientos horizontales N-S, determinados en la prueba NP12 92
Tabla 15. Resumen de las zonas de mayor deformación superficial terrestre con sus respectivos rangos de desplazamientos resultantes, determinados en la prueba NP12. 96
Tabla 16. Ubicaciones de las 32 estaciones geodésicas, en coordenadas geográficas. 103
Tabla 17. Estimaciones de desplazamientos resultantes respecto a las 31 estaciones geodésicas distribuidas en el área total de estudio y las dos principales pruebas de correlación subpíxel. 104
Tabla 18. Estimaciones de RMSE de cada prueba de correlación subpíxel. 105

Resumen

La presente tesis se basa en la correlación de imágenes ópticas satelitales, de los años 2017 y 2019, proporcionados por los satélites SPOT 6 y Sentinel 2, con la finalidad de generar información para la determinación y caracterización de zonas vulnerables a procesos de remoción de masa en la ciudad de Huancabamba, Piura. Los resultados se obtuvieron utilizando el software COSI-Corr, el cual se basa en la metodología de correlación subpíxel de imágenes mediante el uso de transformadas de Fourier. Para seleccionar la ventana temporal de estudio, se efectuó previamente un análisis de la variabilidad climática y meteorológica del área de estudio, ya que presenta un alto nivel de nubosidad y precipitación durante la mayor parte del año. A dicha ciudad se le conoce como "La ciudad que camina", producto de los contantes procesos de remoción en masa que afectan la seguridad física de la ciudad. Estos procesos muchas veces son generados por factores geológicos, meteorológicos o antrópicos, como la mala aplicación de regadío de cultivos por parte de los pobladores, pero muchas veces también son influenciados por factores externos, como la sismicidad local y regional. La identificación y delimitación de las zonas de mayor deformación superficial permitió analizar y realizar representaciones de los campos vectoriales de los desplazamientos con sus respectivas magnitudes, todos ocurridos durante los lapsos de tiempo propuestos. Los resultados de las correlaciones subpíxel, ayudaron a identificar 14 zonas de mayor deformación superficial (desplazamientos) distribuidas en toda el área de estudio, lo cual supuso la presencia de movimientos de masa en cada una de estas zonas. Once de estas zonas, distribuidas en toda el área de estudio, presentan importantes desplazamientos con magnitudes que varían entre 0.17 m a 0.83 m. Mientras que tres regiones, ubicadas dentro de la ciudad, están marcadas por la inestabilidad y el avance muy lento pero continuo de desplazamientos con magnitudes de 0.10 m hasta 0.25 m. Los resultados obtenidos en esta investigación fueron correlacionados y validados principalmente con resultados de estudios geodésicos y morfodinámicos, realizados dentro del ámbito del proyecto general *"Evaluación Geodinámica, Geofísica Y Geología De Los Deslizamientos De Tierra Que Afectan La Seguridad Física De La Ciudad Huancabamba (Piura)",* en el cual también se realizó la presente investigación. Estos resultados aportan un nuevo conocimiento para identificar mejor el peligro de las zonas de deslizamientos de tierra, que actualmente presentan una dinámica activa y que son susceptibles a ocurrir nuevamente, contribuyendo con información de base para la gestión de riesgo de desastres que permitirán la caracterización y adecuada identificación de la inestabilidad de zonas por deslizamientos de tierra en la ciudad de Huancabamba y sus alrededores.

Palabras clave: Deslizamiento de tierra, COSI-Corr, Campo vectorial de desplazamientos, correlación de imágenes satelitales.

Capítulo 1

Introducción

1.1 Introducción

Los deslizamientos de tierra son uno de los principales peligros de origen natural que producen más pérdidas de vidas humanas y económicas. Este tipo de movimiento en masa se origina cuando una porción de terreno, ubicada en una zona de pendiente inclinada, acumula suficiente agua por efecto gravitatorio, producto de precipitaciones, infiltraciones o regadíos, provocando la inestabilidad del suelo por saturación del agua. De esta forma, la gravedad o cualquier agente externo, como un sismo y/o precipitaciones muy intensas, activan y detonan su movimiento en dirección pendiente abajo. La mayor incidencia de este tipo de eventos se presentan en los valles interandinos de la cordillera de los Andes y en zonas de la selva alta del Perú, por las condiciones topográficas, geológicas y climatológicas existentes en dichos lugares (Chang & Hurtado, 1991). Dichos eventos también son generados por factores antrópicos, en donde el más común es el mal uso de sistemas de regadíos no cementados (N. Córdova, 2019). Los daños por deslizamientos son muy altos cuando se trata de zonas rurales, donde las construcciones son de material muy precario (adobe o quincha) y el suelo presente en ellas son propensos a estos eventos. Según el Instituto Nacional de Defensa Civil del Perú, solo en el 2018 ocurrieron 223 emergencias causadas por este tipo de fenómeno geológico, con un saldo de 2298 personas afectadas (INDECI, 2019).

Hoy en día existen varios métodos aplicables al estudio de deslizamientos y las alteraciones que producen en la superficie terrestre, tales como el análisis de fotografías e imágenes captadas por Vehículos Aéreos no Tripulados (Turner et al., 2015) o el uso complementario de GPS como herramienta recurrente para estudios afines a dichos eventos, el cual se ha convertido en un elemento obligatorio en todos los estudios de campo por su capacidad de determinar la extensión terrestre de las remociones de masa en general (Bouali et al., 2019). Otro de ellos es el método de Co-registro de Imágenes Captadas Ópticamente y Correlación (COSI-Corr), desarrollada por el Instituto de Tecnología de California (CALTECH). Los algoritmos y procesos que usa este método están plasmados en un software del mismo nombre,

el cual funciona como una extensión del software ENVI y efectúa ortorrectificaciones a las imágenes para luego correlacionar el espectro cruzado normalizado de los datos ortorrectificados y así determinar las variaciones de la superficie terrestre en determinadas áreas de estudio de las imágenes principales y secundarias que se analizaron. Finalmente se generan imágenes que contienen bandas con los desplazamientos relativos horizontales de Norte-Sur (N-S) y Este-Oeste (E-W) (Leprince et al., 2007).

Gracias al método COSI-Corr se han realizado diversos estudios de deslizamientos que no solo se limitan a zonas terrestres específicas, sino que también a otros tipos de suelos o deformaciones terrestres que están relacionadas, en general, con procesos de desplazamientos en la superficie terrestre, como es el caso de la migración de dunas y tasas de flujo de arena (Scheidt & Lancaster, 2013), a pesar de que la aplicabilidad del método COSI-Corr se centra principalmente en estudios de deslizamientos, avance de glaciares, deformaciones asociadas a sismos y entre otros; hay algunos estudios que expanden los límites del uso de este método, utilizándolo para aplicaciones fuera del planeta Tierra y analizando imágenes satelitales de otros cuerpos celestes, como investigaciones sobre el cambio geomorfológico en la superficie de marte (Francois Ayoub, 2014). La complementariedad del estudio de imágenes satelitales mediante el método COSI-Corr con cualquier otro tipo de investigación, ofrece resultados muy completos para su posterior análisis, como en el caso de las grandes edificaciones en zonas propensas a deslizamientos (Desrues et al., 2019), ya que un estudio geológico a fondo del área de construcción y el uso del método mencionado, ofrecen un panorama detallado del lugar a trabajar, porque de no ser así muchas veces el desenlace de este tipo de desastre causa muchas pérdidas económicas si no se detectan a tiempo.

En Perú existen muy pocos estudios acerca de la aplicación de sensoramiento remoto para la detección de deslizamientos, la mayoría de ellos destacan aquellos producidos por terremotos de gran magnitud, como en el caso del ocurrido en 2007, Pisco (Lacroix et al., 2013). Por otra parte, no solo los fenómenos sísmicos son la fuente recurrente para los deslizamientos, ya que los factores climatológicos, juegan un papel importante también (Mergili et al., 2015). En la presente tesis se determinó los desplazamientos provocados por deslizamientos de tierra, dentro de lapsos de tiempo específicos de una determinada área, utilizando la correlación de imágenes satelitales SPOT 6 y Sentinel 2, a través del método COSI-Corr. Los resultados obtenidos servirán para la revelar zonas vulnerables a deslizamientos, y así prevenir todo tipo de daño a su desenlace.

1.2 Antecedentes

La ciudad de Huancabamba y los espacios geográficos que la rodean, han venido siendo afectados constantemente por deslizamientos de tierra y otros tipos de remociones en masa a través del tiempo. La ciudad misma está afectada aproximadamente en un 50% de su extensión por material inestable y reptante, los cuales básicamente son generados por la saturación del suelo cuyos ejes principales de precipitación se presentan en dirección perpendicular hacia la quebrada Ungulo y el río Huancabamba (CEREN-PNUD, 2000). Los deslizamientos sucedidos dentro y fuera de la ciudad han sido reportados desde hace muchas décadas, es por eso que a dicha ciudad se le dio el nombre característico de "*la ciudad que camina*" (Ramirez, 1966).

Según Silgado (1978), la ciudad de Huancabamba presenta un historial sísmico muy extenso, como los terremotos (1906, 1912, 1928, 1937, 1947) con estimaciones de intensidades mayores a 6.5 grados de magnitud, han afectado la integridad física de la ciudad. Notables agrietamientos de hasta 2 metros de profundidad y deslizamientos con grandes extensiones, son las principales consecuencias de la ocurrencia de sismos de magnitud moderada en el norte del país, que han llevado a la pérdida de vidas humanas, materiales y económicas en la ciudad a través de los años.

Por otro lado, el Comité Ejecutivo de Reconstrucción de El Niño (CEREN) – Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) (2000) estimaron una aproximación de la probabilidad de ocurrencia y el período medio de retorno para sismos de magnitudes de 7.0 y 7.5. En donde cada 40.8 años, probablemente, se produzca un sismo de mb = 7.0 y cada 73.9 años se produzca un sismo de mb = 7.5.

Uno de los primeros deslizamientos mejor registrados en Huancabamba se produjo el 9 de diciembre de 1970, dicho evento estuvo asociado a un sismo de magnitud 7.2 y ocurrió el mismo día, con epicentro al sur de Tumbes, donde se tuvo un desplazamiento superficial de aproximadamente 30 metros, en la parte elevada del sector El Altillo (CEREN-PNUD, 2000).

En cuanto a la zonificación especifica de las áreas más afectadas, Córdova (2018), revela que las zonas urbanas ubicadas en el centro de la ciudad, fueron fuertemente afectadas por los continuos desplazamientos, perjudicando a viviendas de varias calles de los sectores *Jibaja Che*, *La Laguna*, *El Altillo* y lugares alrededor del centro de la ciudad como el barrio *Chalaco*

ubicada al sur de la ciudad; el sector *La Villa* al noreste y otros sectores. Estos sectores urbanos son dañados principalmente por deslizamientos rotacionales que avanzan en dirección este-sureste, hacia la Quebrada Ungulo.

Las lluvias intensas del norte del país, asociadas en ocasiones al Fenómeno del Niño costero, suelen ser otros de los activadores o detonantes de los desplazamientos y las masas reptantes en Huancabamba. Según datos del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI), dicha localidad presenta las mayores precipitaciones pluviales en los meses de enero hasta abril, saturando el suelo y generando eventos de remoción en masa y fuertes corrientes hídricas que producen un gran arranque, acarreo o transporte de sedimentos desde las partes altas montañosa a las partes bajas extendidas, tanto del valle principal como de sus tributarios, lo cual se asocia también a otros procesos como la erosión, escorrentías y torrenteras, derrumbes, deslizamientos, desbordes que afectan a las obras de infraestructura principalmente urbana, vial, terrenos agrícolas y muchas veces también a centros poblados (A. Córdova, 2018).

Según el estudio realizado por CEREN-PNUD (2000), los eventos de reptación de suelos adquirieron mayores dimensiones debido a la infiltración de las aguas de regadío, y de la acción pluvial, por percolación o por infiltraciones a través de los agrietamientos, originándose un proceso de movimiento del suelo de manera casi imperceptible, estimándose aproximadamente que en 43 años (1956 - 1999) se ha presentado un desplazamiento de 15 m, con un promedio de velocidad de 0.35 m/año, como se puede observar entre las intersecciones de las calles Grau y Cajamarca, dentro de la ciudad de Huancabamba.

Otro tipo de movimiento en masa muy común en la ciudad y áreas aledañas, son los derrumbes, según CEREN-PNUD (2000) se han presentado en la parte alta del cerro Guitiligún, frente a la carretera de acceso a la ciudad, en el cual se aprecia muestras de un derrumbe antiguo. Un evento similar fue observado en el sector Molino, flanco derecho del río Huancabamba, en el cual se produjo un derrumbe que ocasionó el represamiento del río, causando daños al puente antiguo, que se cayó por presión de la masa reptante sobre el cerro Guitiligún.

Mediante un estudio geológico realizado por Vílchez et al (2009), se identificó dentro de la ciudad, un flujo de tierra con una escarpa de forma elongada de unos 300 m de ancho y altura

de 200 m, el cual se expandió por la quebrada Ungulo, afectando a viviendas ubicadas en sus márgenes y a la carretera que conduce a Sondor.

A escala regional, el Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (INGEMMET) ha realizado varios levantamientos de las características geológicas y tectónicas en la región de Piura y Huancabamba, incluyendo las zonas de máximas pendientes propensas a deslizamiento, la megaestructura de la deflexión de Huancabamba y fallamiento activo hacia el Este en la zona sub-andina. Como resultado de la evaluación en la ciudad, se ha determinado que la quebrada Ungulo, afectada por fenómenos de movimientos en masa, corresponde a una zona crítica de peligro muy alto por deslizamientos y flujo de detritos, ante la presencia recurrente de lluvias intensas y movimientos sísmicos, pudiendo afectar gravemente la zona urbana de Huancabamba. Al tratarse de eventos periódicos, que anteriormente ha causado daños según versiones de las autoridades y lugareños, recomiendan efectuar un estudio detallado, debiendo trabajarse a nivel de cuenca para caracterizar el peligro y plantear recomendaciones a fin de solucionar el problema que anualmente se repite con las lluvias estacionales (INGEMMET, 2020).

Con respecto a la extensión final de las zonas de deslizamientos y otros movimientos en masa presentes hasta estos últimos años, Córdova (2019), elaboró un mapa temático del alcance de remociones en masa, en el cual muestra la distribución a nivel espacial en toda la extensión territorial de la ciudad de Huancabamba. Se puede observar en la figura 41 (sección 4.7), el alcance de las zonas expuestas al peligro por procesos de movimientos de laderas (polígonos de color amarillo), la delimitación espacial fue desarrollada en base a los deslizamientos activos, geomorfología, material litológico favorable a los deslizamientos y la actividad antrópica.

Hasta la presente fecha son pocos los estudios que hayan aplicado técnicas de sensoramiento remoto con imágenes satelitales, para la detección y caracterización de deslizamientos de tierra en el Perú. Una de ellas es la investigación desarrollada por Lacroix et al (2015), en la cual se detalla el uso de estaciones GPS para la detección de desplazamientos en la ciudad de Maca, en el departamento de Arequipa y conjuntamente se aplica el método COSI-Corr para definir de forma gráfica y extensiva las zonas de deformaciones en dicha región. Ambos resultados se analizaron y compararon, para finalmente obtener resultados más completos.

Otro de los registros más actuales que denota la problemática respecto a los deslizamientos que acontece en la ciudad de Huancabamba, son los resultados preliminares presentados por Villegas-Lanza et al (2019), en donde realizaron 2 campañas de mediciones geodésicas en 34 puntos de control distribuidos en la ciudad, abarcando el 2018 y 2019 (sumando un total de 42 días para ambas campañas). Estas estimaciones se realizaron con instrumentos GPS/GNSS (Sistema de Navegación Global por Satélite) de alta precisión, en sesiones continuas de registro de hasta 28 horas. Sus resultados arrojaron que la zona comprendida en el sector central de la ciudad, abarcando la Plaza de Armas, la Iglesia principal y la Municipalidad, es considerada como el sector más estable, presentando desplazamientos de hasta 5 mm/año en dirección suroeste. Otros puntos ubicados en la periferia de la ciudad presentan desplazamientos de hasta 1 cm. Asimismo, evidenciaron a través de una estación fija, la posible inducción de un desplazamiento súbito de más de 1.5 cm, en dirección oeste a dicha estación por parte de un sismo de gran magnitud (8.0 Mw), ocurrido el 26 de mayo del 2019.

Desde otro punto de vista para la aplicación de imágenes satelitales, Gonzales et al (2007) analizaron imágenes de radar de la Agencia Espacial Europea (ESA), aplicando técnica de interferometría de radar para la detección de desplazamientos. Se desarrollaron 3 interferogramas de una ventana temporal de 70 días. Sin embargo, debido a la adquisición de pocas imágenes de este tipo de la zona de Huancabamba, los resultados preliminares que obtuvieron reportaron baja coherencia que asociaron directamente con la cobertura vegetal presente en las imágenes, pero se mantuvo la afirmación de que la misma ciudad mostraba un desplazamiento en el intervalo de tiempo analizado (03/10/2003 a 12/12/2003).

Actualmente, la información sobre la caracterización geodinámica y geofísica de los deslizamientos en la ciudad de Huancabamba es insuficiente y abarca años pasados. Principalmente se conoce muy poco sobre las tasas y dirección de movimiento de las masas inestables, las áreas de mayor deslizamiento, y las características dinámicas de estos tipos de movimientos en masa. En la presente tesis se plantea realizar estudios geofísicos aplicando técnicas de sensoramiento remoto, a fin de caracterizar y reconocer las zonas de peligro por deslizamiento en la ciudad de Huancabamba y sus alrededores.

1.3 Objetivos

1.3.1 General

Estudiar, analizar y cuantificar los desplazamientos producidos por deslizamientos de tierra en la ciudad de Huancabamba y alrededores, mediante la correlación de imágenes ópticas satelitales.

1.3.2 Específicos

- Identificar las zonas que han presentado deslizamientos de tierra y afectaron la seguridad física de la ciudad de Huancabamba en el periodo de 2017 a 2019.
- Generar información que permita caracterizar el proceso de desplazamiento producido por deslizamientos, su dinámica y su extensión superficial.
- Generar mapas de los desplazamientos superficiales y sus respectivos campos vectoriales.
- Evaluar la aplicabilidad del método para detectar y mapear deformaciones en la superficie, causadas por movimientos en masa, en particular deslizamientos de tierra.

1.4 Planteamiento del problema

La ciudad de Huancabamba y sus alrededores vienen siendo afectadas por procesos de remoción en masa desde hace décadas atrás, de los cuales los más predominantes y usuales son los deslizamientos de tipo rotacional y traslacional, desprendimientos de rocas, asentamientos y reptación de suelos. Por otro lado, las intensas precipitaciones características del norte del Perú y adicionalmente la ocurrencia de sismos, incrementan la probabilidad de activación de los deslizamientos. Estos procesos de geodinámica externa han traído consigo la preocupación por parte de los habitantes, ya que han acarreado este tipo de problema por muchos años y en la última década se ha ido intensificando. Por lo que la población viene exigiendo a las autoridades por su seguridad física, la infraestructura de la ciudad y los campos de cultivos que son afectados continuamente. Los desplazamientos de tierra generan zonas de alta inestabilidad en la ciudad y sus alrededores, llegando a provocar pérdida de vidas humanas y materiales en todo el territorio. En esta tesis se plantea el desarrollo de procesos de correlación subpíxel aplicados a imágenes satelitales para identificar y analizar los deslizamientos de tierra ocurrido en el área de estudio y de esta forma generar información para prevención y gestión de riesgos en la ciudad de Huancabamba.

1.5 Justificación del problema

El reconocimiento y detección de los procesos de remoción en masa, permitirá la caracterización e identificación de sectores de mayor peligro que pueden afectar la seguridad física de la comunidad y servirá de información de base para que las autoridades implementen planes y medidas de preparación y prevención ante el peligro de deslizamientos. Para este propósito, también se espera encontrar la relación de los desplazamientos con los principales activadores: Precipitación y sismicidad. Los resultados de la presente tesis también ayudarán a definir las diferentes alternativas de desarrollo y ocupación de los territorios de la ciudad de Huancabamba y sus alrededores, de manera que se pueda aprovechar con una visión segura y sostenible los territorios, teniendo en cuenta la dinámica del terreno y los procesos geológicos que la modifican.

1.6 Área de estudio

El área de estudio abarca la ciudad de Huancabamba y sus alrededores. La ciudad está ubicada al noroeste del Perú, en el distrito y provincia de Huancabamba, perteneciente al departamento de Piura, situándose en la vertiente oriental de la Cordillera de los Andes, al margen derecho del río Huancabamba, afluente del rio Chamaya. El área de estudio comprende elevaciones de 1817 a 2720 m.s.n.m (ver Apéndice A) y la ciudad se encuentra a una altura aproximada de 1957 m.s.n.m. Para este estudio se ha definido un área de 32.18 Km^2 con un perímetro de 24.81 Km, cuyas delimitaciones geográficas referenciales en sistema de coordenadas Universal transversal de Mercator (UTM) y geográficas, están representados en la tabla 1. Por otro lado, en la Figura 1, se presenta la delimitación del área de estudio en base a una imagen SPOT 6 con proceso de panshaperning, perteneciente al 14 de julio del 2017 y en color verdadero (RGB=321).

PUNTOS	SISTEMA DE COORDENADAS			
	UTM		GEOGRÁFICAS	
	ESTE	NORTE	LATITUD	LONGITUG
Noreste	675254.00 m E	9427215.00 m S	-5.180000°	-79.418806°
Noroeste	669020.00 m E	9427233.00 m S	-5.180000°	-79.475042°
Sureste	675224.00 m E	9417514.00 m S	-5.267625°	-79.418806°
Suroeste	668996.00 m E	9417521.00 m S	-5.267625°	-79.475042°

Tabla 1. Delimitación del área de estudio en Sistema de Coordenadas UTM y Geográfica.

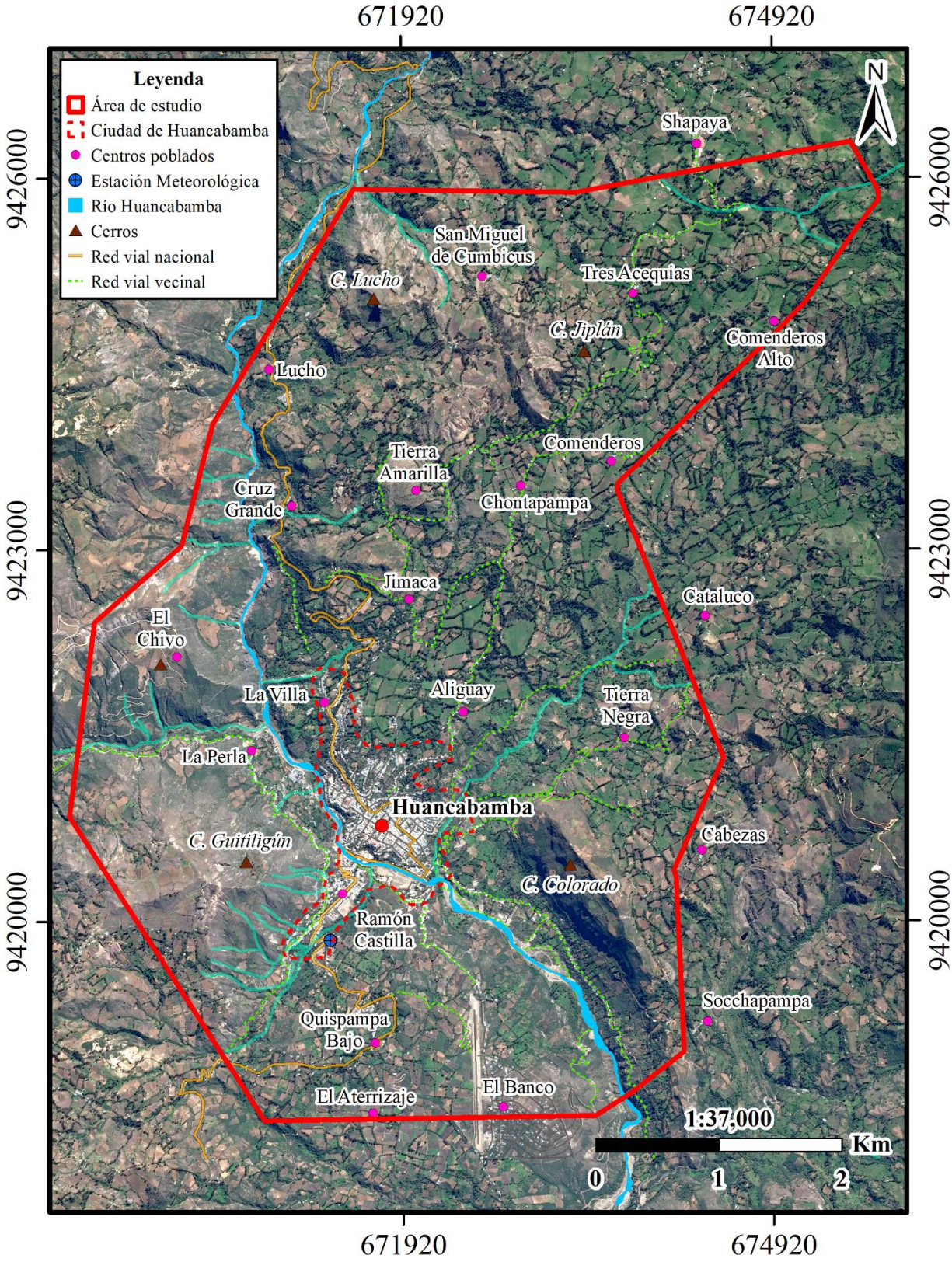


Figura 1.Mapa de ubicación del área de estudio (polígono rojo). La ciudad de Huancabamba se encuentra al margen derecho del rio Huancabamba, entre los cerros Huititingun y Colorado.

1.7 Clima

El clima de la ciudad de Huancabamba y sus alrededores es cálido a semihúmedo y varía de acuerdo con la altitud respecto al fondo del valle, de manera que en las proximidades del valle el clima es cálido y seco; en la parte media de las vertientes es templado a semihúmedo y en las vertientes boscosas con pajonales más elevadas es frio a semihúmedo. Huancabamba recibe una importante cantidad de lluvia en casi todo el año, incluso para el mes más seco (junio), siempre ocurren precipitaciones pluviales con 26 mm, siendo el mes más lluvioso febrero con un promedio de 169 mm por lo que las mayores precipitaciones ocurren en los meses de enero a marzo; por lo tanto y, de acuerdo a la clasificación climática de Köppen y Geiger, el clima de la zona de Huancabamba se ubicaría en un clima CFB, es decir Marítimo de costa occidental (Oceánico) (A. Córdova, 2018).

1.8 Generalidades meteorológicas

Los datos de precipitación y temperatura, fueron registrados y proporcionados por la estación meteorológica automática *Huancabamba* perteneciente al Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI), la cual está ubicada al suroeste de la ciudad. Estos datos permitieron determinar la temperatura promedio en la zona de estudio y los meses de menor y mayor precipitación en todo el año, identificándose promedios de 18 °C en el año 2017, 17.8 °C para 2018 y 18.2 °C en el 2019. Los meses de menor precipitación son julio y agosto (< 9 mm), siendo los más favorables para la adquisición de imágenes ópticas satelitales por su bajo porcentaje de nubosidad u otro efecto desfavorable en la adquisición de las imágenes. Las estimaciones de la precipitación por parte de la estación meteorológica, fueron realizadas a escala de mm/hora, tanto para temperatura y precipitación, por lo que se tuvo que recalcular el factor temporal para obtener una escala mayor de medida (mm/mes o mm/año). En la Figura 2 se presenta la distribución de la precipitación acumulada mensual para el periodo 2017 a 2019, en la que se observan altas magnitudes durante los meses de marzo y abril, y bajas durante los meses de julio a septiembre. Por otro lado, se determinó que la precipitación anual acumulada en el 2017, disminuyó de 501 mm/año a 402 mm/año (2018) y se elevó al valor de 427 mm/año en 2019.

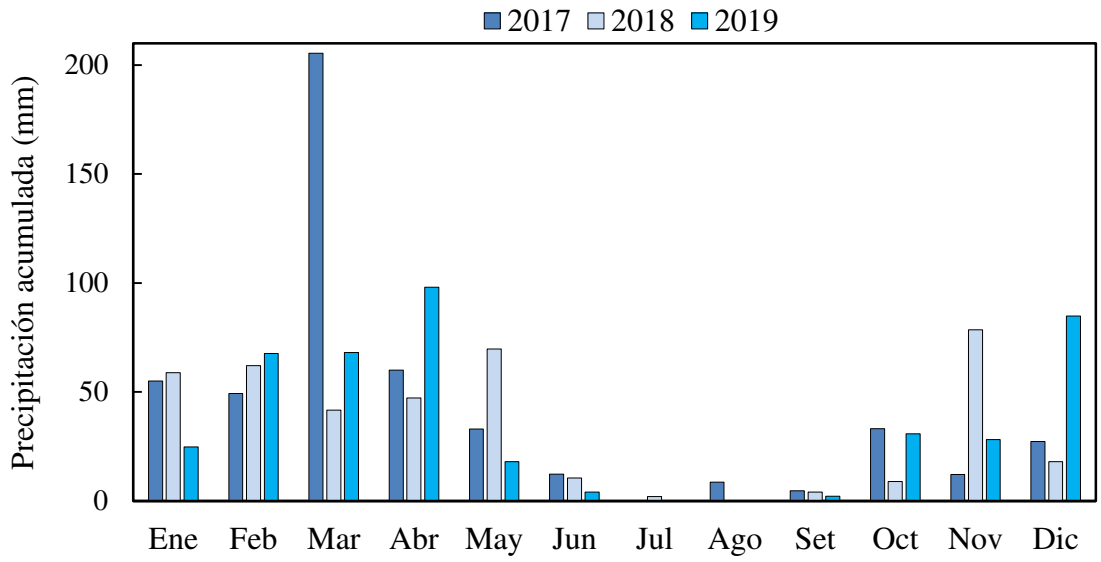


Figura 2. Precipitación acumulada mensual de los años 2017, 2018 y 2019. Fuente: SENAMHI.

1.9 Sismicidad entre 2017 y 2019

Para complementar el presente estudio y correlacionar los resultados con agentes detonantes, se realizó una búsqueda y reconocimiento de los eventos sísmicos ocurridos desde el 14 de julio de 2017 hasta el 13 de diciembre del 2019, ambas fechas corresponden respectivamente a la fecha inicial y final de la ventana temporal total de estudio. El principal criterio para la búsqueda de los sismos se representa en la Figura 3, donde la distribución de los eventos sísmicos de magnitudes Mw, mayores o iguales 4.4, fueron identificados dentro de un sector circular de radio de 300 Km y tomando como centro a la ciudad de Huancabamba y de igual manera, para los sismos mayores o iguales a Mw 6.0, se usó otro sector circular, pero con radio de 600 Km. El reconocimiento de estos sismos se realizó a través del portal web del buscador en el catálogo del servicio geológico de los Estado Unidos (USGS) (https://n9.cl/4grz), el buscador de terremotos de las Instituciones de Investigación Incorporadas para la Sismología (IRIS) (https://n9.cl/vw24g) y los reportes sísmicos proporcionados por el Instituto Geofísico del Perú (IGP) (https://n9.cl/igp_reportes_sismicos). Se determinó un total de 54 eventos símicos de diferentes magnitudes y profundidades (Ver apéndice H). De los cuales 38 se encuentran entre el rango de magnitud Mw de 4.4 y 4.9. También se identificó 11 terremotos de magnitudes Mw entre 5.0 y 5.5, mientras que solo se determinó cinco terremotos de magnitudes Mw mayores a 6.0. Las profundidades de estos sismos oscilan aproximadamente entre 3 Km y 145 Km. Notablemente, se aprecia tres eventos sísmicos muy cercanos a la zona de estudio. El primero se desarrolló el 26 de diciembre del 2017 y se ubicó aproximadamente a 55 km al sur de la zona de estudio, con una magnitud Mw de 4.7, y a una profundidad de

81.37 Km. Luego, el segundo sismo más cercano a la zona de estudio, a 127 km al este de la ciudad de Huancabamba, se desencadenó el día 22 de diciembre del 2017 con una magnitud Mw de 4.9 y a una profundidad de solo 10 Km. El tercer sismo significativo, tuvo una magnitud Mw de 5.1, aproximadamente a 147 km de la ciudad y con una profundidad de 49.33 km (17 de abril del 2019). Cabe destacar que no se observó sismicidad local en la zona de estudio y por lo general los sismos de subducción e intraplaca, son los que más afectan a Huancabamba. Las características de estos eventos sísmicos son analizadas conjuntamente con los datos de precipitación y los resultados de las pruebas de correlación subpíxel, para determinar las posibles reciprocidades entre ellas y describir si influyeron en la detonación y/o el avance lento de los movimientos de masa determinadas en la zona de estudio. Debido a que estos sismos se determinaron en magnitudes de cuerpo (mb) y magnitud de momento (Mw), se usó la ecuación: $M_w = 0.85m_b + 1.03, (3.5 \leq m_b \leq 6.2)$, propuesto por Scordilis (2006), para disponer todas las magnitudes de los sismos en un solo tipo de magnitud (Mw), tal como se observa en el apéndice H.

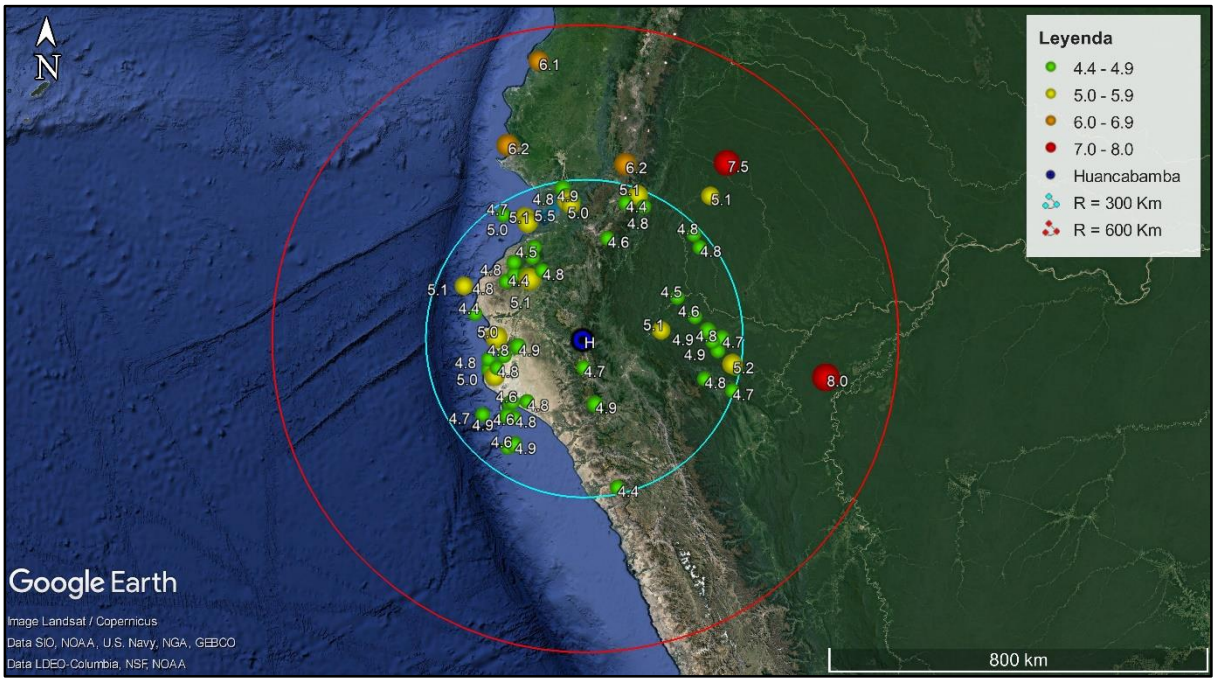


Figura 3. Distribución espacial de los sismos identificados. Los puntos verdes representan los sismos de magnitudes entre 4.4 a 4.9, los puntos amarillos son los sismos de magnitudes entre 5.0 y 5.5, los puntos de color naranja representan los sismos mayores a 6.0 y los puntos rojos, los sismos de magnitud Mw de 7.5 y 8.0. Están en dos radios de búsqueda de 300 Km para sismos ≥ Mw 4.4 (circulo celeste) y 600 Km para sismos ≥ Mw 6.0 (círculo rojo), con centro en la ciudad de Huancabamba (punto azul). Fuente: Google Earth.

Capítulo 2

Marco Teórico

La detección y cuantificación de los movimientos superficiales terrestres son esenciales para el estudio y comprensión de muchos procesos relativos a su dinámica, tales como la tectónica, ruptura sísmica, los deslizamientos de tierra y glaciares de hielo, entre otros más. La estimación directa de los desplazamientos y las deformaciones superficiales terrestres, cae dentro de una disciplina más amplia de la geodesia, que también incluye estudios de la forma, el movimiento y el campo gravitacional de la Tierra, esta disciplina amplia es la teledetección, abarcando muchos conceptos físicos y geofísicos, los cuales en esta sección serán presentados, conjuntamente con las definiciones y características de los principales movimientos en masa, para entender los procesos posteriores a este capítulo.

2.1 Generalidades de la Teledetección

La Teledetección, Percepción Remota o Sensoramiento Remoto, son las técnicas de adquisición de información a distancia de un objeto o área de interés, es decir, sin que exista contacto físico entre dicho objeto y el sensor. Los sensores de los satélites reciben la información acerca del objeto, a través de la energía electromagnética. Dicha información puede estar codificada en la frecuencia, intensidad o polarización de la onda y es transferida directamente desde el objeto o indirectamente por reflexión, dispersión o reemisión hacia el sensor. Todos los materiales de la Tierra reflejan o emiten energía electromagnética, por lo que los sensores miden la intensidad de la radiación electromagnética emitida por dicho objeto para el posterior estudio de sus propiedades físicas. Para que pueda producirse la observación remota de un sistema, es necesario que el sensor detecte un flujo magnético proveniente de éste. Por ello, se introducen las magnitudes radiométricas básicas como el flujo radiante, densidad de flujo radiante y la intensidad radiante, las cuales generalmente son utilizadas en la Física para describir el campo radiactivo (Sobrino et al., 2000).

2.1.1 Magnitudes radiométricas básicas

Estas magnitudes miden el número y energía de las partículas ionizantes, así como sus distribuciones espaciales y temporales. A continuación, se presenta los principales conceptos que permiten entender de qué modo puede utilizarse la radiación electromagnética en la teledetección con la finalidad de obtener información sobre los sistemas a analizar, exponiendo también los aspectos básicos relacionados con el transporte, por parte de las ondas electromagnéticas, de la energía radiante y se introducen las características radiactivas de la materia (ver tabla 2).

2.1.1.1 Campo radiactivo y energía radiante (Q)

Es el campo electromagnético transportado por una onda entre la fuente emisora y el detector. La energía asociada con la onda electromagnética se llama energía radiante Q y su unidad de medida son los Joules *(J).*

2.1.1.2 Flujo Radiante (ϕ)

Es la energía radiante por unidad de tiempo, $\phi = dQ/dt$, en donde su unidad es el watt (W). Desde el punto de vista de la teoría electromagnética, se interpreta como el flujo del vector de Poynting (Liou, 2002).

2.1.1.3 Emitancia Radiante (M)

Es la energía emitida por radiación desde una superficie (S) por unidad de tiempo y de superficie, se mide en Watts por metro cuadrado (Wm^{-2}). A veces se habla de la emitancia espectral M_λ para hacer referencia a la emitancia en una longitud de onda concreta, en cuyo caso su unidad de estimación es $Wm^{-2}\mu^{-1}$. Se representa mediante la ecuación: $M = d\phi/dS$ (Liou, 2002).

2.1.1.4 Irradiancia (E)

Su concepto es similar al de la emitancia, pero con la diferencia a que está referido a la energía que llega a un cuerpo a través del espacio procedente de otro (que ha emitido). Tiene las mismas unidades que la emitancia, análogamente puede hablarse también de irradiancia espectral y su unidad de estimación es Wm^{-2}. Se representa por la ecuación $E = d\phi/dS$.

2.1.1.5 Intensidad Radiante (I)

Es el flujo radiante transportado dentro de un ángulo sólido $d\Omega$. Se define como $I = d\emptyset/d\Omega$, y su unidad de medida es el Watt por estereorradián (Wsr^{-1}) (Liou, 2002).

2.1.1.6 Radiancia (R) y Radiancia Espectral (R_λ)

Es el flujo radiante en un determinado ángulo sólido $d\Omega$ que atraviesa una superficie perpendicular $(dS\cos\alpha)$ a la dirección de propagación (α), de la radiación. La radiancia se expresa como $R = d^2\phi/d\Omega dS\cos\alpha$, donde su unidad de medida es el watt por metro cuadrado y estereorradián $(Wm^{-2}sr^{-1})$ (Liou, 2002). La radiancia $R(\boldsymbol{L},\boldsymbol{n})$, en función de la posición $\boldsymbol{L}$ y del vector unitario de la dirección $\boldsymbol{n}$, proporciona una descripción completa del campo radiactivo. Este parámetro cobra interés especial en teledetección ya que es la magnitud detectada por los sensores. En general, en teledetección se utiliza la radiancia espectral, que es la radiancia por unidad de longitud de onda, $R_\lambda = dR/d\lambda$, medida en watts por metro cuadrado, estereorradián y micrómetro $(Wm^{-2}sr^1\mu m^{-1})$.

Magnitud	Símbolo	Ecuación	Unidad (S.I)
Energía radiante	Q	-	J
Flujo radiante	ϕ	$\phi = dQ/dt$	W
Emitancia radiante	M	$M = d\phi/dS$	Wm^{-2}
Irradiancia	E	$E = d\phi/dS$	Wm^{-2}
Intensidad radiante	I	$I = d\emptyset/d\Omega$	Wsr^{-1}
Radiancia	R	$R = d^2\phi/d\Omega dS\cos\alpha$	$Wm^{-2}sr^{-1}$
Radiancia espectral	R_λ	$R_\lambda = dR/d\lambda$	$Wm^{-2}sr^1\mu m^{-1}$

Tabla 2. Magnitudes radiométricas básicas relativas al campo de radiación (Sobrino et al., 2000).

2.1.2 Espectro Electromagnético

La radiación electromagnética es una forma de energía con propagación ondulatoria y desplazamiento a través del espacio a la velocidad de la luz, transfiriendo cantidades discretas de energía (cuantos). Estas ondas se caracterizan por tener longitudes muy variadas; extendiéndose desde los rayos gamma y rayos X, cuyas radiaciones son de menor longitud de onda, pasando por la luz ultravioleta, la luz visible y los rayos infrarrojos, hasta llegar a las ondas de radio, las cuales presentan mayor longitud de onda. El conjunto de todas las longitudes de onda se denomina espectro electromagnético (Figura 4) (Liou, 2002).

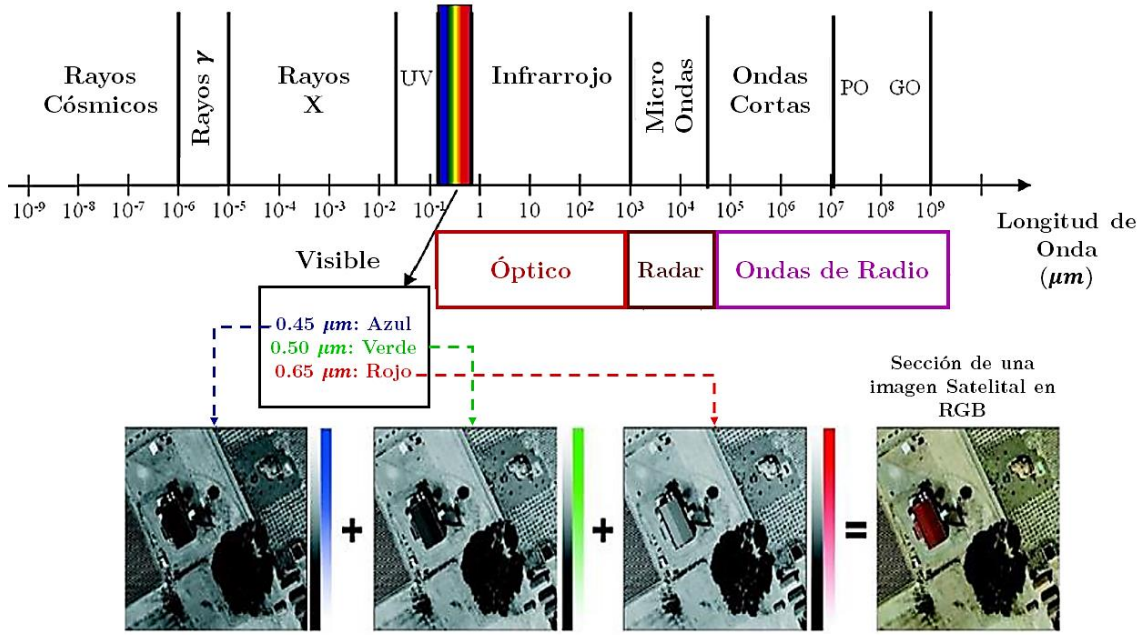


Figura 4. Espectro Electromagnético. Adaptado de Baghdadi & Zribi (2016).

2.1.3 Datos raster

Un dato raster es cualquier tipo de imagen digital representada en una tabla de píxeles, o una matriz de L filas y P columnas (Figura 5). Cada píxel contiene un valor numérico (número digital o valor radiométrico) que es el valor medio de la energía devuelta por los elementos de la superficie del suelo cubiertos por este píxel, después de la discretización. El dominio de definición de estos valores depende del tipo de codificación de imagen utilizada. Para la visualización de imágenes, el valor numérico de píxeles se puede comparar con una lista de colores (Ose et al., 2016).

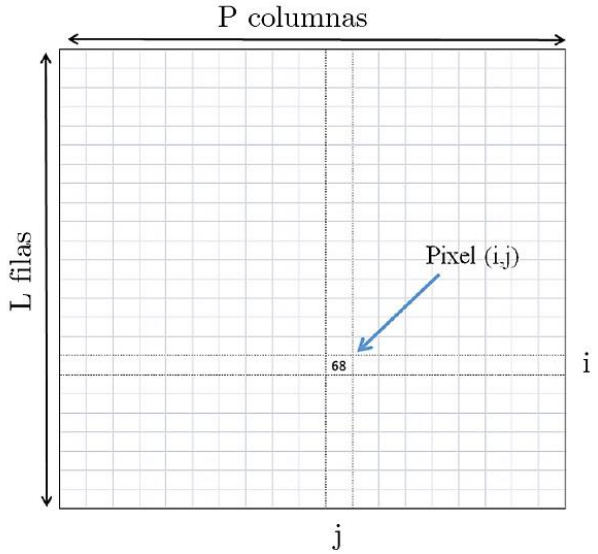


Figura 5. Arreglo de pixeles en matriz de L filas y P columnas. El pixel con ubicación (i, j), contiene el numero digital 68. Adaptado de Ose et al (2016).

Por ejemplo, una imagen pancromática es un registro digital, en un solo rango de longitudes de onda que se superponen en particular al espectro visual de la cantidad de radiación electromagnética medida a nivel de píxeles. Esto quiere decir que una imagen de este tipo presenta una sola banda (canal). En la Figura 6, los valores de píxeles de la imagen se representan usando una escala de niveles de gris que van desde el negro, para un valor 0 que significa que no se detecta energía a nivel del sensor, a blanco, para un valor 255 que significa saturación del sensor.



Figura 6. Sección de una imagen pancromática SPOT 6. El valor de un píxel corresponde a un porcentaje de nivel de gris entre el negro (0) y el blanco (255).

Por otro lado, para el caso de una imagen multiespectral, el registro digital de la cantidad de radiación electromagnética que recibe cada píxel se realiza en varios rangos de longitud de onda, a menudo inconexos y más estrechos en comparación con el modo pancromático. Por tanto, una imagen multiespectral se compone de varias bandas, cada una conteniendo la cantidad de radiación medida en rangos de longitud de onda muy específicos para cada píxel (por ejemplo, verde, rojo o infrarrojo cercano) (Ose et al., 2016).

Las bandas de las imágenes se adquieren según los proveedores, ya sea en forma de archivos de imágenes separadas, en cuyo caso la imagen multiespectral completa se compone de una lista de archivos; o de forma apilada, en un solo archivo. Por tanto, una imagen de teledetección puede verse como una matriz digital tridimensional: dos dimensiones planimetrías (las filas y columnas de la imagen) y una dimensión radiométrica (los canales espectrales de la imagen).

En la Figura 7, la dimensión vertical corresponde a los planos de información de los diferentes canales de imagen.

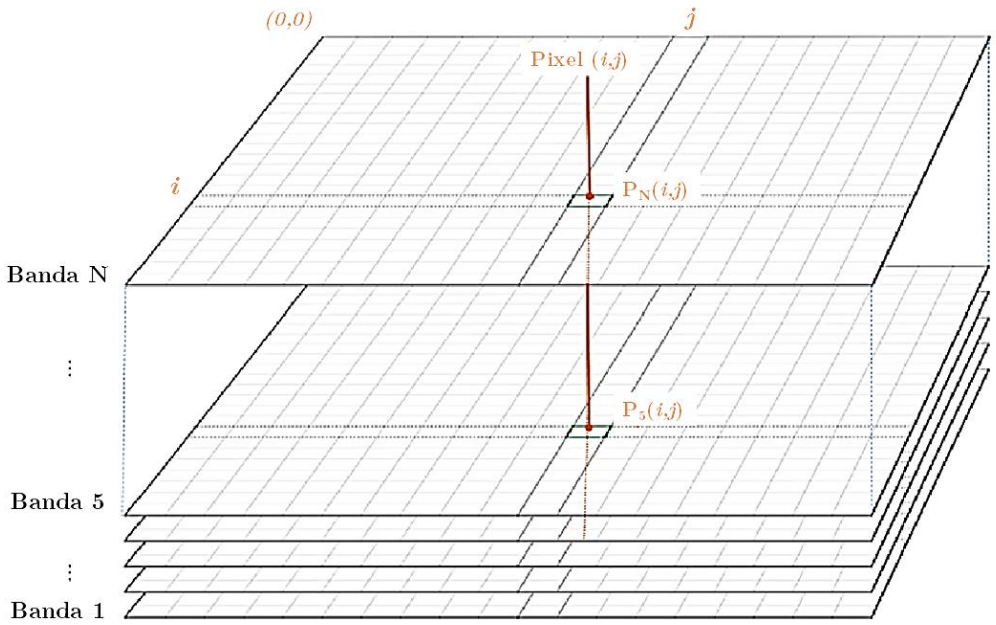


Figura 7. Representación de una imagen multiespectral, donde las matrices apiladas y superpuestas en forma de planos contienen la información que componen sus diferentes bandas. El pixel P (i, j) es un vector cuyos componentes son P1 (i, j), P2 (i, j), P3 (i, j), … P_N (i, j), cuyos valores de los píxeles están en las bandas 1 a N. Adaptado de Ose et al (2016).

2.1.4 Formatos de almacenamiento

El tamaño de las imágenes tiende a aumentar a medida que mejora la calidad, por lo tanto, se utilizan métodos para comprimir sus datos. Los formatos de imagen más extendidos ofrecen diferentes tipos de compresión, con o sin pérdida de información. El formato JPEG2000, que es en sí mismo un estándar de compresión, utiliza transformaciones de ondículas para reducir el tamaño de las imágenes, mientras que el formato GeoTiff a menudo se usa sin comprimir información.

Por ejemplo, para el caso de una imagen pancromática SPOT 6, usada en la presente tesis, consta de 1.5 m de resolución espacial y está compuesta por 63984 filas y 46904 columnas, se almacena en un archivo cuyo tamaño es de aproximadamente 5.6 GB en formato GeoTiff (codificación de 12 bits de los valores radiométricos y sin comprimir); sin embargo, el mismo archivo de imagen no ocupa más de aproximadamente 200 MB cuando se almacena en formato JPEG2000 y distribuidas en un mosaico de imágenes que componen la imagen total (compresión sin pérdida), lo cual si se juntan todas las imágenes del mosaico, resulta

aproximadamente 1.8 GB, siendo una cantidad menor a la presente en el formato GeoTiff. Esta tasa de compresión no es constante; esencialmente depende de la imagen y su contenido informativo.

Para imágenes multiespectrales, es decir, archivos que contienen múltiples bandas relacionados con mediciones de radiación en diferentes longitudes de onda, la información de píxeles y bandas se puede organizar de tres formas diferentes de almacenamiento (Figura 8):

a) **BSQ** (*Banda secuencial*)

   Es el formato más simple, con cada línea de datos seguidas inmediatamente por la siguiente línea de la misma banda espectral, lo cual es óptimo para el acceso espacial (x, y) a cualquier parte de una sola banda espectral.

b) **BIL** (*Banda Intercalada por Línea*)

   Proporciona el funcionamiento complementario entre el proceso espacial y espectral y es el formato recomendado para la mayoría de procesos en la teledetección. Los valores de los píxeles correspondientes a los diferentes canales se almacenan línea por línea.

c) **BIP** (*Banda Intercalada por pixel*)

   Este tipo de almacenamiento, proporciona un óptimo funcionamiento de proceso espectral. Los valores de píxel de cada banda se almacenan de forma secuencial píxel a píxel.

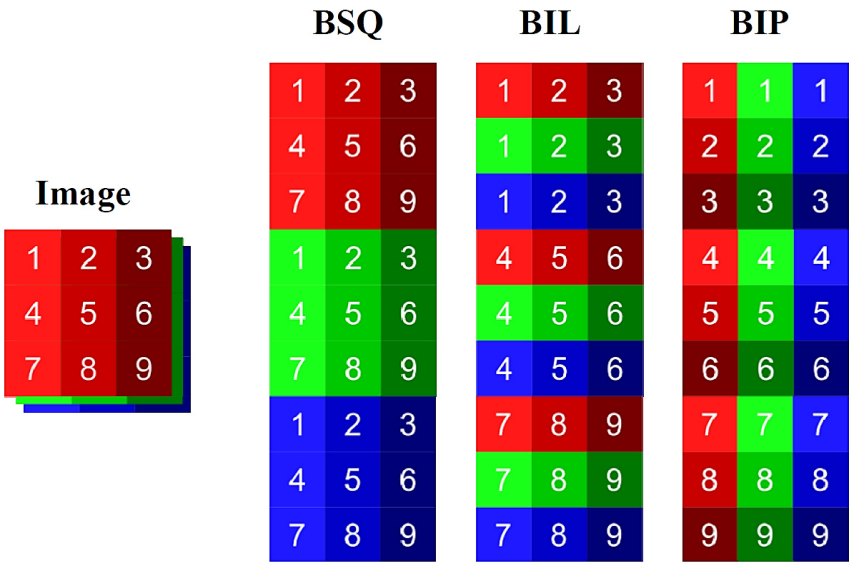


Figura 8. Diferentes formas de almacenamiento de pixeles y bandas de datos raster (Ose et al., 2016).

2.1.5 Sensores, plataformas y tipos de resolución

Se entiende por plataforma los satélites como por ejemplo Sentinel, SPOT, ASTER etc. o aviones que transportan la tecnología necesaria para percibir, almacenar y transmitir imágenes a distancia. Por otro lado, un sensor es el aparato que se encarga de capturar las imágenes a distancia y es transportado en una determinada plataforma. Puede captar información para diferentes regiones del espectro y cada una de estas regiones se denomina banda (SIGMUR, 2005). Por ejemplo, SPOT 6 es una plataforma que contiene el sensor NAOMI, el cual tiene 5 bandas (azul, verde, rojo, infrarrojo cercano y pancromática). La salida de radiación (emitida o reflejada) de la superficie terrestre es un fenómeno continuo en 4 dimensiones (espacio, tiempo, longitud de onda y radiancia). Un sensor debe muestrear continuamente, discretizándolo en cada una de esas dimensiones. El modo en que esta discretización se lleva a cabo define los cuatro tipos de resolución con los que se trabaja en teledetección:

a) **Resolución espacial**

   Se interpreta como el tamaño del objeto más pequeño que puede ser distinguido en una imagen: tamaño del pixel sobre el terreno. Por lo tanto, una imagen de alta resolución hace referencia a aquélla que tiene un tamaño de resolución pequeña, y en la cual se pueden observar detalles finos.

b) **Resolución temporal**

   Indica el tiempo del paso del satélite sobre la vertical de un mismo punto. Con ello se determina la periodicidad de adquisición de imágenes de una misma zona, por ejemplo, los satélites Sentinel 2 (A o B), puede ver la misma área de la superficie terrestre cada 10 días (5 días en conjunto), mientras que SPOT 6 lo hace cada tres días.

c) **Resolución espectral**

   Indica el número y anchura de las bandas espectrales que puede discriminar el sensor. Entre mayor sea esta resolución se tendrá información del comportamiento de una misma cobertura en diferentes bandas espectrales.

d) **Resolución radiométrica**

   Describe la capacidad del sensor para discriminar niveles o intensidades de radiancia. La energía electromagnética recibida por el sensor, cuando se convierte a número digital, necesita un formato binario (número de bits) para codificarse. Esto significa que, a mayor número de bits reservados para almacenar el valor de la reflectancia de un pixel, mayor resolución radiométrica se tendrá.

2.2 Correlación de Imágenes Digitales

Dentro de la teledetección se encuentran las técnicas de Correlación de Imágenes Digitales (DIC), las cuales se sustentan básicamente en la extracción de información de cambio de la superficie del suelo mediante comparaciones de diferentes imágenes, capturadas en distintos momentos y de una misma área.

La idea fundamental es obtener una correspondencia entre cada punto referencial de la imagen principal (sin deformación) y de la imagen secundaria (posterior a un evento de deformación superficial terrestre como sismo, deslizamiento, avalancha, etc.). Las técnicas basadas en DIC realizan este proceso, tomando pequeños subconjuntos (o ventanas) de referencia de la imagen principal y definiendo la ubicación del punto central (verde) y de referencia (naranja) en dicho subconjunto (ver figura 9). Luego, se realiza una búsqueda de dicho subconjunto inicial (ahora deformado) en la imagen secundaria, donde en cada subconjunto deformado se obtiene el desplazamiento y la información de la deformación. De este modo se busca que coincidan los puntos centrales de cada subconjunto en cada imagen y así determinar la diferencia de cambio entre la ubicación de cada punto. Muchos subconjuntos son recogidos en la configuración de referencia, a menudo con un parámetro de separación (también llamado *paso*) para reducir el coste computacional (teniendo en cuenta que normalmente se solapan subconjuntos). El resultado final del análisis correlativo entre ambas imágenes es una cuadrícula resultante con nuevos puntos (ver Apéndice F), que contienen la información del desplazamiento y de la deformación con respecto a la configuración inicial (De La Ossa Pérez & Vaquero, 2015).

Sin embargo, otro requisito básico en este tipo de técnica, es la aparición de un patrón de moteado aleatorio en la superficie de la imagen, lo cual es importante para la determinación de una solución única en el proceso de correlación. Esencialmente, identificar la correspondencia entre píxeles individuales en dos imágenes es imposible porque el valor de intensidad de un solo píxel normalmente se puede encontrar en miles de otros píxeles en la imagen secundaria. En consecuencia, no se produce una correspondencia única, es por eso que la coherencia entre dos patrones de moteado se logra considerando un píxel y su vecindad en la imagen principal (Figura 9a) y buscando el mismo subconjunto en la imagen secundaria (Figura 9b) (Caporossi & Mazzanti, 2018).

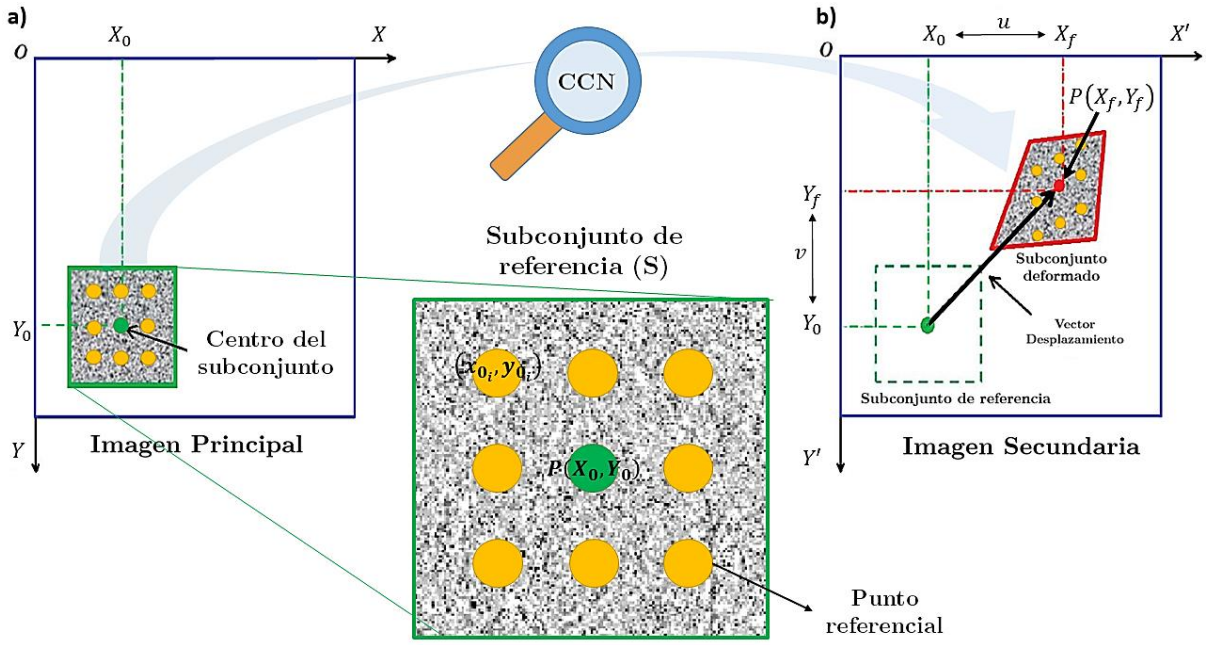


Figura 9. Esquema básico del principio de correlación de imágenes digitales. a) El patrón de moteado presente en el subconjunto de referencia de la imagen principal (cuadro verde), es determinado en su forma distorsionada en b) la imagen secundaria, delimitado por el cuadro rojo del subconjunto deformado. La separación entre ambos subconjuntos determina un vector que proporciona información de propagación y dirección del proceso de deformación. Los puntos verde y anaranjado representan respectivamente al punto central (P) del subconjunto de referencia y a puntos referenciales. Adaptado de Caporossi & Mazzanti (2018).

2.2.1 Deformación de subconjuntos

De acuerdo a lo mencionado anteriormente, un subconjunto de referencia representa un grupo de puntos con sus respectivas coordenadas de ubicación y se puede representar como en la figura 9. Su forma puede ser arbitraria y no necesariamente cuadrada, pero lo más importante es la determinación de su punto central ya que en base a la ubicación de este, se determina las coordenadas de los puntos del subconjunto deformado.

Según Blaber et al (2015) la transformación de puntos de subconjuntos de referencia inicial a la configuración final (imagen secundaria) está normalmente restringida a una transformación de primer orden lineal (aunque las transformaciones de segundo orden también pueden ser usadas si se prevén deformaciones grandes como se muestra a continuación

$$(i,j) \in S \begin{cases} x_{f_i} = x_{0_i} + u_{0f} + \dfrac{\partial u}{\partial x_{0f}}\left(x_{0_i} - X_0\right) + \dfrac{\partial u}{\partial y_{0f}}\left(y_{0_j} - Y_0\right) \\ y_{f_j} = y_{0_j} + v_{0f} + \dfrac{\partial v}{\partial x_{0f}}\left(x_{0_i} - X_0\right) + \dfrac{\partial v}{\partial y_{0f}}\left(y_{0_j} - Y_0\right) \end{cases} \quad (1)$$

$$\boldsymbol{p} = \left\{u \;\; v \;\; \frac{\partial u}{\partial x} \;\; \frac{\partial u}{\partial y} \;\; \frac{\partial v}{\partial x} \;\; \frac{\partial v}{\partial y}\right\}^T \qquad (2)$$

Donde x_{0_i} y y_{0_j} son las coordenadas de un punto dentro del subconjunto de referencia (S) en la imagen principal, X_0 y Y_0 son las coordenadas del centro del subconjunto de referencia y las coordenadas del punto en el subconjunto deformado (en la imagen secundaria) son x_{f_i}y y_{f_j}.

La deformación es parametrizada por desplazamientos u y v y sus derivados, todos los cuales son constantes para un subconjunto dado. La ecuación (2) define un vector de deformación generalizada $\boldsymbol{p}$. Los índices (i, j) se utilizan para la ubicación relativa de los puntos con respecto al centro del subconjunto, así como para establecer correspondencias entre los puntos de subconjunto en la imagen principal y secundaria. S representa el conjunto que contiene todos los puntos del subconjunto de referencia. El subíndice "$0f$" utilizado en la ecuación (1) significa que la transformación esta desde el sistema de coordenadas de la imagen principal (X, Y) hasta el sistema de coordenadas de la imagen secundaria (X', Y') (ver Figura 9). La ecuación (1) también puede escribirse en forma de matriz

$$\varphi_0 + \omega\left(\Delta\varphi_0, \boldsymbol{p}_f\right) = \begin{bmatrix} x_0^T \\ y_0^T \\ 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 + \frac{du}{dx_f} & \frac{du}{dy_f} & u_f \\ \frac{dv}{dx_f} & 1 + \frac{dv}{dy_f} & v_f \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_0^T \\ \Delta y_0^T \\ 1 \end{bmatrix} \qquad (3)$$

donde φ es un vector aumentado que contiene las coordenadas *x* e *y* de los puntos del subconjunto, Δx y Δy son las distancias entre los puntos del subconjunto y el centro del subconjunto, y ω es una función llamada *warp* (deformación).

Para propósitos de eficiencia computacional, también se puede permitir que el subconjunto de referencia se deforme dentro de la configuración de referencia. De esta manera el proceso se reduce a una mejor coincidencia entre las coordenadas x_{f_i}, y_{f_j} y x_{0_i}, y_{0_j} obteniéndose una expresión como en la siguiente

$$(i, j) \in S \begin{cases} x'_{0_i} = x_{0_i} + u_{00} + \frac{\partial u}{\partial x_{00}}\left(x_{0_i} - X_0\right) + \frac{\partial u}{\partial y_{00}}\left(y_{0_j} - Y_0\right) \\ y'_{0_j} = y_{0_j} + v_{00} + \frac{\partial v}{\partial x_{00}}\left(x_{0_i} - X_0\right) + \frac{\partial v}{\partial y_{00}}\left(y_{0_j} - Y_0\right) \end{cases} \qquad (4)$$

donde x'_{0_i} e y'_{0_j} son las coordenadas x e y de un subconjunto de referencia deformado. El subíndice "00" de la ecuación (4) representa que la transformación se produjo entre dos sistemas de coordenadas diferentes en la imagen principal (Blaber et al., 2015).

2.2.2 Transformadas de Fourier (TF)

Las ecuaciones de Correlación Cruzada son los pilares para el desarrollo de la técnica DIC aplicada en la presente tesis y su desarrollo está basado en el uso de Transformadas de Fourier, es por esto que en esta sección se describe sus conceptos y términos para tener un mejor conocimiento de su uso. La idea central de la Transformada de Fourier es el análisis espectral de la descomposición de una señal en sus frecuencias constitutivas y el almacenamiento de la amplitud de cada componente en el dominio de la frecuencia. Por lo tanto, una TF es la representación de una señal en el dominio de la frecuencia y contiene exactamente la misma información que la función original. Lo único que difiere es el procedimiento de representación. El análisis de Fourier permite entonces examinar la señal desde otro punto de vista (Universidad del Pais Vasco, 2020).

2.2.2.1 Transformada Discreta de Fourier (TDF)

Debido a que una imagen digital es considerada como una función bidimensional finita $f(x, y)$ y discreta, entonces existe su Transformada Discreta de Fourier (TDF). La TDF representa una imagen como la suma ponderada de funciones sinusoidales bidimensionales. Esto da como resultado un espectro bidimensional $F(u, v)$ de frecuencias espaciales. La TDF toma números discretos (píxeles) y los convierte en el espectro logarítmico de frecuencia. Una serie de Fourier se basa en una función periódica en un espectro discreto con dimensiones fijas, las cuales están presentes en una imagen raster. Las imágenes casi nunca son funciones no periódicas completas, por lo que una transformada de Fourier resuelve esto, con funciones no periódicas que se acercan al infinito. Entonces la TDF de una secuencia de longitud finita $f(n)$ en el rango $0 \leq n \leq N-1$ se define como

$$\mathcal{F}(k) = \sum_{n=0}^{N-1} f(n)\, e^{-i2\pi k \frac{n}{N}} \quad para\ 0 \leq k \leq N-1 \qquad (5)$$

Donde $N-1$ como frecuencia de muestreo. Cuando se aplica este concepto al proceso de correlación subpíxel del software COSI-Corr, la variable N pasa a representar el tamaño de la

ventana y n representa el centro de un píxel. Esta ecuación está basada en la fórmula de Euler $e^{i\theta} = \cos\theta + i\sin\theta$. En donde el termino $e^{-i2\pi k}$ es una representación de cosenos y funciones de seno complejas, donde k es número de onda. El valor de píxel original $f(n)$ se multiplica por un coseno y seno, lo cual representa a un correlacionador cruzado (Meijer, 2015).

Por otro lado, se define la Inversa de la Transformada Discreta de Fourier (iTDF) como

$$f(n) = \frac{1}{N}\sum_{k=0}^{N-1} \mathcal{F}(k)\, e^{i2\pi k\frac{n}{N}} \quad para\ 0 \le n \le N-1 \qquad (6)$$

Para simplificar las ecuaciones (1) y (2), se define un factor de entrelazamiento (*twiddle factor*) como $W_N = e^{-i\frac{2\pi}{N}}$. Sustituyendo el factor de entrelazamiento en las ecuaciones (5) y (6) se obtiene las expresiones más compactas para la TDF y la iTDF respectivamente (Mneney, 2008).

$$\mathcal{F}(k) = \sum_{n=0}^{N-1} f(n)\, W_N^{kn} \quad para\ 0 \le k \le N-1 \qquad (7)$$

$$f(n) = \frac{1}{N}\sum_{k=0}^{N-1} \mathcal{F}(k)\, W_N^{-kn} \quad para\ 0 \le n \le N-1 \qquad (8)$$

2.2.2.2 Transformada Rápida de Fourier (TRF)

Cabe destacar que la TRF no es una nueva transformada, sino que se trata de un algoritmo para el cálculo de la TDF. Su importancia radica en el hecho que elimina una gran parte de los cálculos repetitivos a que está sometida la TDF, por lo tanto, se logra un cálculo más rápido. Además, la TRF generalmente permite una mayor precisión en el cálculo de la TDF disminuyendo los errores de redondeo (Universidad del Pais Vasco, 2020). En palabras simples, la TRF son algoritmos eficientes para ejecutar la TDF, el cual calcula n-pares y n-impares separados (en píxeles para funciones que representan imágenes), por lo tanto, el requisito de este algoritmo es que el número de muestras *N* en la función debe ser una potencia de dos. Divide la señal en partes más pequeñas para acelerar la transformación. Por ejemplo, la Transformada Rápida de Fourier $\hat{f}$ que describe la función f hacia el infinito se expresa como

$$\hat{f}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f\,(n) e^{-i\omega n} dx \qquad (9)$$

Los resultados de esta ecuación son secuencias en el dominio de la frecuencia, que van desde 0 a 2π. La variable dx es el tamaño de los contenedores de frecuencia TDF y es relativo a la frecuencia de muestreo n de su ecuación. Comparando la TDF de $F(u,v)$ y la función original $f(x,y)$, da como resultado un número complejo que contiene la amplitud y fase de cada seno. Cada punto del espectro de logaritmos representa una función de onda sinusoidal basada en la amplitud y la frecuencia. En realidad, las funciones de onda pueden tener exactamente el mismo valor que un píxel (ver Figura 10) porque solo se necesita el centro del píxel. Es común cambiar las frecuencias más bajas en el centro del gráfico de la TDF bidimensional, debido a las posibilidades de enmascaramiento adicionales en las imágenes. La función de entrada $F(u,v)$ se construye a partir de píxeles, por lo tanto, debe apreciarse como una función rectangular. La TRF de la función rectangular da como resultado una función de Seno Cardinal $sinc$ normalizada, donde $sinc(0) = 1$ (Meijer, 2015).

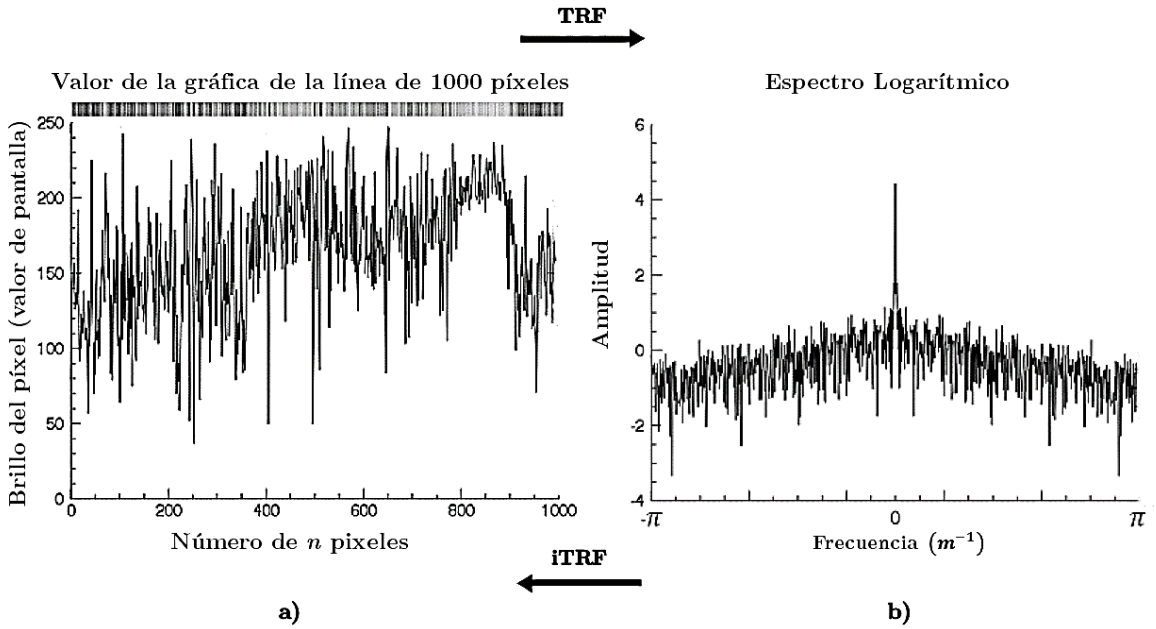


Figura 10. Resultados del estudio sobre desplazamiento superficial del glaciar Lirung obtenidos por Meijer (2015), donde se aplica la TRF a una función monodimensional. a) Se presenta los valores de una línea de píxeles (N = 1000) del glaciar, con el tamaño del intervalo de frecuencia de $2\pi/N$. b) Esto se calcula con un algoritmo de TRF en un espectro logarítmico. Mientras que la inversa de la Transformada Rápida de Fourier (iTRF) calcula el dominio espacial original. Adaptado de Meijer (2015).

El resultado de la TRF es un número complejo y contiene una parte real y una imaginaria. La amplitud se calcula mediante la raíz de la suma del cuadrado de la parte real e imaginaria, teniendo un pico típico cerca de las bajas frecuencias. El $senoF(0)$ no oscila y determina la amplitud promedio de $f(x,y)$. El espectro de fase correspondiente es casi completamente un patrón aleatorio y se calcula mediante la tangente inversa de la parte imaginaria dividida por la

parte real. COSI-Corr usa este espectro de fase porque está menos influenciado por la intensidad del píxel, por lo tanto, las diferentes iluminaciones, como las sombras, son menos importantes (Meijer, 2015).

2.2.2.3 Transformada Rápida de Fourier bidimensional

En el ejemplo presentado en la Figura 10, se calculó la TRF a partir de una sola función, es decir, de una línea formada por píxeles. El cálculo de un TRF de una imagen bidimensional, comprende su aplicación del algoritmo de la TRF a cada fila y columna de pixeles. Esto da como resultado una matriz con la misma resolución que la imagen de entrada (Meijer, 2015).

Por otro lado, el software COSI-Corr cuenta con la opción de enmascaramiento en el correlacionador por frecuencia, el cual es un tipo de filtro de alta frecuencia. COSI-Corr utiliza el principio de una TRF bidimensional, pero no la combina en una imagen, sino que utiliza la TRF para calcular el desplazamiento por fila de un cambio de este a oeste (E-W). Donde el coeficiente de correlación máximo determina el desplazamiento. Luego, otra serie de aplicaciones de TRF por fila en ambas imágenes da como resultado un desplazamiento de norte a sur (N-S). Esto acelera el proceso, pero es vulnerable a la imagen de ruido con patrones repetitivos (Leprince et al., 2007).

2.2.3 Correlación Cruzada (CC)

En la sección 2.2.1 se analizó las ecuaciones para determinar los valores de deformación mediante las transformaciones de las coordenadas de cada punto presente en los subconjuntos. Pero el problema yace ahora en identificar el subconjunto que contenga el patrón de moteado específico para que se puede reconocer y correlacionar de forma inmediata y no aleatoria con su semejante (subconjunto deformado) ubicado en la imagen secundaria. Para resolver esto, se debe establecer una medida de similitud entre el subconjunto de referencia y el subconjunto deformado. Esto se realiza comparando los valores de la escala de grises en los puntos del subconjunto de referencia con los valores de grises de los puntos del subconjunto deformado. Es por eso que las ecuaciones de correlación cruzada (simplificada y normalizada) representan formas de medida para dicho fin y son las más usadas en las técnicas de Correlación de Imágenes Digitales.

Los procesos basados en CC miden las similitudes entre funciones, esto significa que se estima qué tan presente está una función en otra. Según Artigao et al (2005), en caso de imágenes de

gran tamaño, es conveniente efectuar esta operación en el dominio de frecuencias a través de las transformadas de Fourier, de forma que se puede comprobar que la operación de correlación se reduce a la multiplicación de las transformadas de Fourier de cada una de las imágenes a comparar. El cálculo de las transformadas se puede simplificar utilizando la transformada rápida de Fourier (TRF). De este modo, el procedimiento del cálculo digital de correlación entre dos imágenes se reduce a calcular la transformada de Fourier de cada una de ellas, multiplicarlas y, finalmente, calcular la Transformada de Fourier inversa. El proceso anterior se puede contemplar como un filtrado espacial de la transformada de Fourier que modifica cada una de las fases espaciales (u, v) de la TF de la imagen-

Cuando se aplica la Transformada Discreta de Fourier (TDF) a la ecuación de la CC, esta comprobará la presencia de cada nueva función seno de la función $g(n)$ en la función $f(n)$. La ecuación simplificada de la CC se expresa como

$$CC_{f,g} = \sum_{n=0}^{N-1} f(n)g(n) \qquad (10)$$

En otras palabras, la ecuación 10 ofrecerá la cuantificación del grado de interdependencia entre las funciones $f(n)$ y $g(n)$, a través de un proceso básico de multiplicación y acumulación, dando como resultado el coeficiente de correlación. Para encontrar el seno más correspondiente a la función $f(n)$, la función $g(n)$ se desplaza en un paso n relativo a la función f. Cada turno tiene su propio coeficiente de correlación, donde su valor máximo determina la mejor correlación. Esto solo es posible cuando ambas funciones tienen aproximadamente el mismo orden de valores. La correlación cruzada normalizada (CCN) resuelve este problema:

$$CCN_{f,g} = \frac{\sum_{n=0}^{N-1} f(n)g(n)}{\sqrt{\sum_{n=0}^{N-1} f(n)^2 \sum_{n=0}^{N-1} g(n)^2}} \qquad (11)$$

En la ecuación 11, la secuencia de Fourier de una imagen principal $f(n)$ se correlaciona con la secuencia de Fourier de la imagen secundaria $g(n)$. Las secuencias se desplazan en n pasos entre sí para encontrar el desplazamiento correlativo y esta misma variable determinará la precisión de dicho proceso. Las correlaciones cruzadas se utilizan en base de algoritmos de TRF, pero también se usan para correlacionar un dominio de Fourier con otro (Meijer, 2015).

De acuerdo al análisis descriptivo presentado en la sección 2.2.1, la ecuación (11) puede tomar la siguiente forma

$$CCN_{f,g} = \frac{\sum_{(i,j)\epsilon S}\left(f\left(x_{0_i}, y_{0_j}\right) - f_m\right)\left(g\left(x_{f_i}, y_{f_j}\right) - g_m\right)}{\sqrt{\sum_{(i,j)\epsilon S}\left[f\left(x_{0_i}, y_{0_j}\right) - f_m\right]^2 \sum_{(i,j)\epsilon S}\left[g\left(x_{0_i}, y_{0_j}\right) - g_m\right]^2}} \qquad (12)$$

Donde f y g representan respectivamente las funciones de intensidad de escala de grises de la imagen principal y de la imagen secundaria en una ubicación específica (x, y). Las funciones f_m y g_m corresponden a los valores medios de la escala de grises del subconjunto de referencia y deformado (Blaber et al., 2015).

Finalmente, un análisis muy detallado de la conversión de la CC simplificada (ecuación 10) a la CCN (ecuación 11), es propuesto por Kaso (2018), donde desarrolla un esquema para el cálculo de la CCN en base a la Transformada Rápida de Fourier, a través de algoritmos descritos en el lenguaje del software MATLAB.

2.2.4 Aplicación a deslizamientos

Los deslizamientos de tierra son una amenaza natural importante con impactos socioeconómicos en todo el mundo. La reducción de la amenaza por deslizamientos no solo depende de la información espacio-temporal sobre la frecuencia, distribución y sus factores predisponentes y desencadenantes, sino también de la cuantificación y comprensión de su cinemática. Los deslizamientos de tierra a menudo ocurren en terrenos montañosos de difícil acceso y las mediciones in situ con GPS, extensómetros o dispositivos similares se limitan a unos pocos puntos seleccionados. La interferometría SAR espacial se ha utilizado en varias investigaciones de deslizamientos de tierra, pero proporciona una cobertura espacial limitada debido a los efectos de escala, escorzo y sombra y, en particular, las tasas de desplazamiento variables en el espacio y el tiempo a menudo dificultan el desenvolvimiento de la fase. Las técnicas DIC aún se usan con menos frecuencia para deslizamientos de tierra que para el flujo de glaciares o el desplazamiento cosísmico, pero debido a las limitaciones descritas y la creciente disponibilidad de imágenes ópticas de muy alta resolución espacial (VHSR), se está convirtiendo en una herramienta importante para cuantificar los componentes horizontales de los deslizamientos de tierra (Stumpf et al., 2016).

2.2.5 Principales limitaciones

Las mediciones basadas en técnicas de DIC pueden presentar incertidumbres importantes que se deben tener en cuenta al aplicar dichas técnicas. La precisión teórica de los algoritmos de correlación de subpíxeles puede alcanzar ~1/50 de la resolución de la imagen, mientras que, en las aplicaciones del mundo real, el ruido radiométrico, los cambios de iluminación y la deformación de la superficie a menudo imponen un límite de una quinta parte de un píxel incluso en condiciones ideales. Pueden surgir limitaciones adicionales de inexactitudes geométricas de los datos de entrada, incluidos modelos de sensores imperfectos, residuos de corregistro y errores de ortorrectificación relacionados con la calidad del DEM, pero también de las características del sitio de estudio, como la densa cobertura de vegetación, sombras proyectadas en movimiento, movimiento aparente de características de reflectancia especular, y desajustes debidos a bajo contraste o fuertes cambios superficiales. En particular, las áreas con topografía accidentada y cubierta de vegetación densa aún plantean desafíos para la medición basada en DIC (Stumpf et al., 2016).

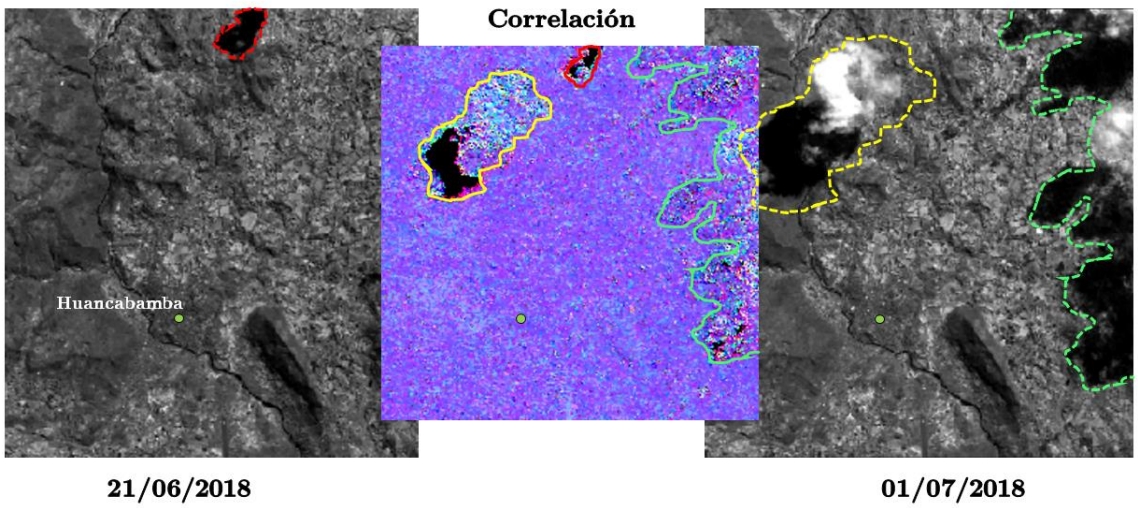


Figura 11. Secciones de dos imágenes digitales Sentinel 2 (21/06/2018 y 01/07/2018), que fueron correlacionadas y el resultado es la sección central, en donde se observa distorsiones causadas por la presencia de grandes sombras y nubosidad (polígonos rojo, amarillo y verde).

2.3 Procesos de remoción de masa

También llamados fenómenos de inestabilidad de laderas o movimientos en masas, se producen cuando una masa de tierra, rocas, escombros o material no consolidado, se desprende en forma de bloques aislados o masivamente, descendiendo por efecto gravitatorio en caída libre

causando daños importantes en lugares de altas pendientes. Las zonas montañosas tropicales son muy susceptibles a sufrir este tipo de problemas, debido a que generalmente se conjugan cuatro elementos fundamentales para la generación de fenómenos de remoción en masa: gradiente topográfico, sismicidad, meteorización de la roca parental y lluvias intensas (Suarez, 1998).

2.3.1 Principales detonantes

Muchas veces las causas de las remociones de masa, son analizadas desde un punto de vista tradicional, el cual se limita a pendientes extremadamente empinadas, pero no reflejan con precisión la naturaleza real del problema. La razón de una cobertura geográfica tan amplia tiene mucho que ver con los diferentes mecanismos desencadenantes de los deslizamientos de tierra (Highland & Bobrowsky, 2008). Por otro lado, la precipitación combinada con los eventos sísmicos son dos principales activadores de remociones en masa. Los terremotos superiores a magnitudes de 4.0 pueden crear tensiones que debilitan las pendientes y tienden a producir los deslizamientos de tierra más grandes y destructivos. Keefer (1984), estudió los datos de 40 terremotos históricos en todo el mundo para determinar las características, los entornos geológicos y los peligros de los deslizamientos de tierra causados por eventos sísmicos. Esta muestra lo complementó con datos de intensidad de varios cientos de terremotos en EE.UU. para estudiar las relaciones entre la distribución de deslizamientos de tierra y los parámetros sísmicos, llegando a las conclusiones como se muestra en la Tabla 3. De igual manera las erupciones volcánicas, el deshielo y las actividades antrópicas, son atribuidos como activadores secundarios de las remociones de masa.

Magnitud	Tipo de movimiento
4.0	Caídas de roca y porciones del suelo, fracturación cosísmica.
4.5	Deslizamientos de suelo o bloques de suelo.
5.0	Deslizamientos de roca, bloques de roca, esparcimientos laterales, flujos de suelo y deslizamientos submarinos.
6.0	Avalanchas de roca.
6.5	Avalanchas de suelo.

Tabla 3. Magnitudes sísmicas necesarias para que se produzca deslizamientos de tierra. Adaptado de (Keefer, 1984).

Desafortunadamente, algunos tipos de deslizamientos, tales como los generados por desplazamientos con magnitudes muy bajas (< 1 mm), no pueden ser detectados directamente a través de técnicas simples de sensoramiento remoto y la solución más viable es la aplicación de métodos in situ para su estudio. Suele ocurrir que las "huellas" dejadas por los grandes deslizamientos en la superficie terrestre, son evidentes, y aunque los rasgos de los deslizamientos más pequeños puedan no ser individualmente distinguibles, la apariencia áspera general de una pendiente específica puede sugerir que ocurrieron movimientos masivos (Rodgers, 1993). En la tabla 4 se muestra activadores secundarios de deslizamiento de tierra, tanto naturales como antrópicas.

ACTIVADORES SECUNDARIOS		
NATURALES		ANTRÓPICAS
GEOLÓGICOS	MORFOLÓGICOS	
Presencia de materiales débiles, susceptibles a roturas o con fisuras.	Levantamiento tectónico o volcánico.	Excavaciones al pie de una pendiente.
Discontinuidad estructural orientada adversamente (falla, inconformidad, contacto, etc.).	Erosión fluvial, glacial y de las olas, al pie de una pendiente.	Mal uso de regadío.
Alta permeabilidad.	Erosión de márgenes laterales.	Desvío (planificado o no planificado) de una corriente fluvial o corriente de costa larga mediante la construcción de muelles, diques, presas, etc.
Contraste en la rigidez (material rígido y denso sobre materiales plásticos).	Remoción de vegetación (por incendios forestales, sequía).	Uso de rellenos de tierra inestables, para la construcción.

Tabla 4. Activadores secundarios de deslizamientos de tierra. Adaptado de Highland & Bobrowsky (2008).

2.3.2 Principales tipos de movimientos de masa

Dado que son muchos los parámetros involucrados en el desencadenamiento de deslizamientos, muchas veces solo se los clasifica según el mecanismo de movimiento y material involucrado. Generalmente los materiales implicados son rocas o tierra, (o ambos); este último se describe como tierra si está compuesto esencialmente de partículas de arena o partículas más finas y escombros, si está compuesto de fragmentos más gruesos. Por otro lado, la mecánica interna del evento se describe mediante el tipo de movimiento que realiza (Highland & Bobrowsky, 2008). A continuación, se detalla las definiciones y características de los principales movimientos en masas, que servirán para la identificación apropiada del peligro geológico en el desarrollo de la presente tesis.

2.3.2.1 Caídas de rocas

Son movimientos bruscos y descendentes de rocas, tierra o ambos, que se desprenden de pendientes pronunciadas o acantilados. La separación ocurre a lo largo de discontinuidades tales como fracturas, grietas y planos de estratificación, en donde el movimiento ocurre por caída libre, rebote y balanceo (Figura 12). El material que cae generalmente golpea la pendiente inferior en ángulos menores que el ángulo de caída, provocando un rebote (Highland & Bobrowsky, 2008).

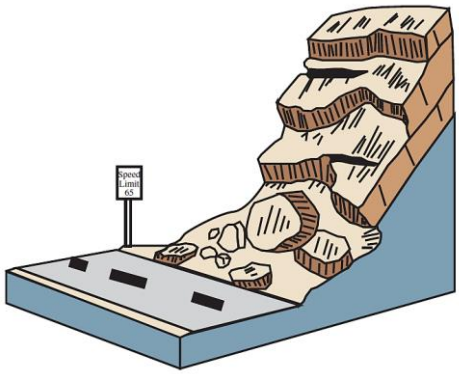


Figura 12. Caídas de rocas (Highland & Bobrowsky, 2008).

2.3.2.2 Desprendimientos

Se caracterizan por la rotación hacia adelante de una pendiente de una masa de suelo o roca alrededor de un punto o eje por debajo del centro de gravedad de la masa desplazada (Figura 13). Generalmente son causados por presencia de agua o hielo en las grietas de su masa. Los desprendimientos pueden consistir en rocas, escombros (material grueso) o materiales terrestres (material de grano fino) e incluso pueden ser complejos y compuestos (Highland & Bobrowsky, 2008).

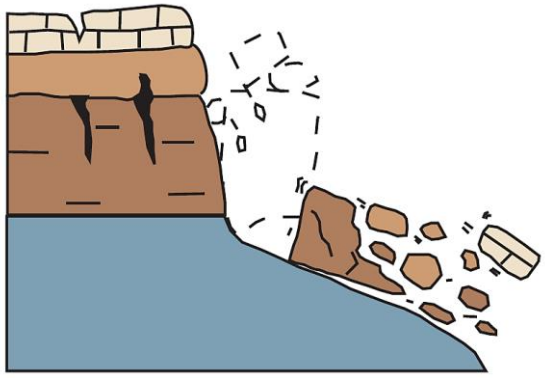


Figura 13. Desprendimientos (Highland & Bobrowsky, 2008).

2.3.2.3 Deslizamiento Rotacional

La superficie de ruptura de este tipo de movimiento en masa, se curva hacia arriba y el movimiento del deslizamiento es aproximadamente rotacional alrededor de un eje paralelo al contorno de la pendiente (Figura 14). La masa desplazada puede, en determinadas circunstancias, moverse relativamente a lo largo de la superficie de ruptura con poca deformación interna, mientras que la parte frontal del material desplazado puede moverse casi verticalmente hacia abajo y la superficie superior del material desplazado puede inclinarse hacia atrás. Están asociados con pendientes que oscilan valores desde 20° a 40° aproximadamente. La superficie de ruptura generalmente tiene una relación de profundidad a longitud entre 0,3 y 0,1 y son extremadamente lentos (menos de 0,3 metros cada 5 años) a moderadamente rápido (1,5 m/mes) (Highland & Bobrowsky, 2008).

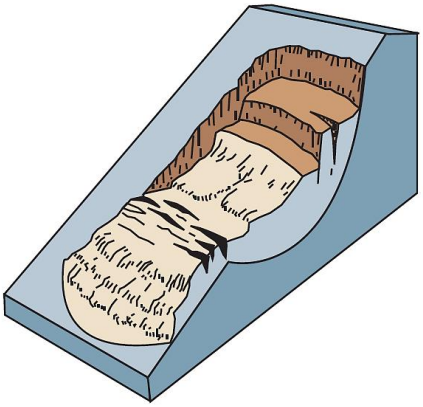


Figura 14. Deslizamiento Rotacional (Highland & Bobrowsky, 2008).

2.3.2.4 Deslizamiento Traslacional

Son los más comunes y se encuentran globalmente en todo tipo de entornos y condiciones. La masa presente se mueve a lo largo de una superficie relativamente plana con poco movimiento de rotación o inclinación hacia atrás. Este tipo de deslizamiento puede progresar en distancias considerables si la superficie de ruptura está suficientemente inclinada, a diferencia de los deslizamientos rotacionales, que tienden a restablecer el equilibrio del deslizamiento (Figura 15). El movimiento puede ser inicialmente lento (1,5 m/mes) pero muchos son de velocidad moderada a extremadamente rápida (1,5 m/día). Con una mayor velocidad, la masa de deslizamientos traslacionales puede desintegrarse y convertirse en un flujo de escombros (Highland & Bobrowsky, 2008).

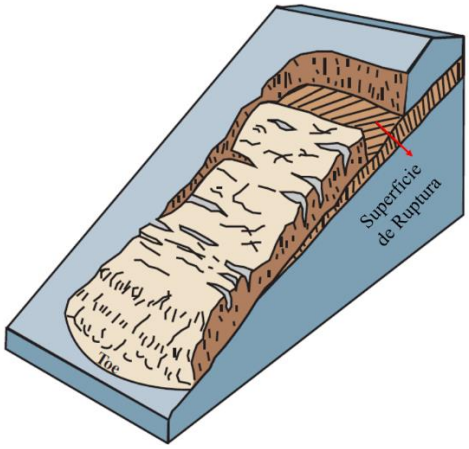


Figura 15. Deslizamiento Traslacional. Adaptado de Highland & Bobrowsky (2008).

2.3.2.5 Reptación

Consiste en movimientos muy lentos a extremadamente lentos del suelo subsuperficial sin una superficie de falla definida. Según Highland & Bobrowsky (2008), generalmente es de unos pocos centímetros al año (~ 10 cm/año o 1 m/década) y afecta a decenas de kilómetros cuadrados. Se les atribuye a las alteraciones climáticas relacionadas con los procesos de humedecimiento y secado en suelos, usualmente, muy blandos o alterados. La reptación puede preceder a movimientos más rápidos como flujos de detritos o deslizamientos. Como se observa en la Figura 16, las evidencias de reptación consisten en la inclinación de postes y cercas y/o la inclinación o curvatura de los troncos de los árboles y arbustos (Suarez, 1998).

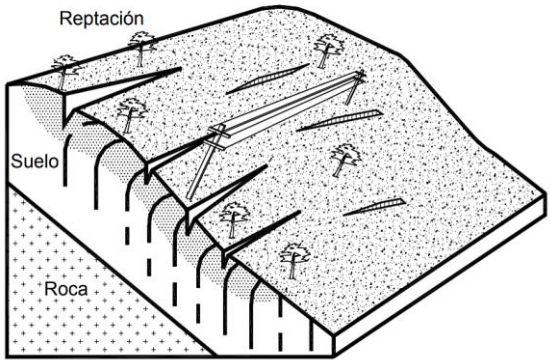


Figura 16. Reptación de suelo (Suarez, 1998).

Existen otros tipos de movimientos de masa que se caracterizan por velocidades más altas, entre las que se encuentran los flujos de escombros, avalanchas de escombros, entre otros. Los flujos de escombros han sido observados en el 2019 en la quebrada Ungulo en Huancabamba y fueron perjudiciales para la población que se asienta cerca de las riberas de las quebradas.

2.3.3 Clasificación basada en velocidades

La velocidad de los desplazamientos producidos por los movimientos de masa, es un parámetro característico y muy importante, debido a que, dependiendo de la magnitud estimada, esta indicará la naturaleza destructiva del movimiento en masa. La Tabla 5 muestra la escala de velocidades de movimientos de masa propuesta por Varnes & Cruden (1996) en la que según la escala de velocidad se define la categoría del movimiento y se detalla los posibles desenlaces o escenarios de los movimientos en masa respecto a su velocidad, en base a estudios y registros de casos en los que los efectos de estos eventos, en los seres humanos y sus actividades han sido descritos y para los cuales también se conocen las velocidades de los deslizamientos de tierra, sugiriendo una correlación entre la vulnerabilidad y las velocidades. Un límite importante parece estar entre el movimiento muy rápido y el extremadamente rápido, que se aproxima a la velocidad promedio con que corre una persona (4 - 5 m/s). Otro límite importante es entre las clases lentas y muy lentas (1,6 m/año), por debajo del cual se encuentran algunas estructuras sin daños provocados por deslizamientos de tierra (Varnes & Cruden, 1996).

Velocidad (mm/s) y tipo de movimiento en masa	**Velocidad típica**	**Probable desenlace**
Extremadamente rápido > $0.5x10^{3}$	> 5 m/s	Catástrofe con mayor destrucción de edificaciones y pérdida de vidas humanas.
$0.5x10^{1}$ < Muy rápido < $0.5x10^{3}$	3 m/min - 5 m/s	Baja probabilidad de evacuación.
$0.5x10^{-1}$ < Rápido < $0.5x10^{1}$	1.8 m/h - 3 m/min	Posible evacuación.
$0.5x10^{-3}$ < moderado< $0.5x10^{-1}$	13 m/mes - 1.8 m/h	Conservación temporal de estructuras estables.
$0.5x10^{-5}$ < lento < $0.5x10^{-3}$	1.6 m/año - 13 m/mes	Las estructuras insensibles se pueden mantener con trabajos de mantenimiento.
$0.5x10^{-7}$ < Muy lento < $0.5x10^{-5}$	1.6 mm/año - 1.6 m/año	Algunas estructuras permanentes no dañadas por el movimiento.
Extremadamente lento < $0.5x10^{-7}$	< 16 mm/año	Imperceptible sin instrumentos; construcción posible con precauciones.

Tabla 5. Escala de velocidades de movimientos de masa. Adaptado de Varnes & Cruden (1996).

Capítulo 3

Marco Metodológico

3.1 Descripción general

La presente tesis se sustenta fundamentalmente en la técnica de correlación subpíxel de imágenes ópticas, la cual se basa en un proceso muy eficiente para la determinación de zonas de deslizamientos de tierra y la cuantificación de los desplazamientos producidos por dichos eventos. Sin embargo, las imágenes satelitales usadas en este tipo de estudios, muchas veces vienen con distorsiones que son producidas por distintas fuentes (ver sección 2.2.6). Es por eso que es recomendable en muchos casos la aplicación de diferentes correcciones (atmosférica, radiométrica y/o geométrica), luego de la adquisición inmediata de las imágenes y previamente al uso del software COSI-Corr, ya que con esto se obtiene resultados con mayor filtrado de distorsiones, pero no garantiza una buena calidad. Posteriormente se realiza los cortes respectivos a las imágenes para la reducción de su totalidad a solo una sección de menor tamaño que contenga la zona de estudio y estarán listos para ser usados en el proceso de correlación subpíxel.

La correlación de subpíxel puede proporcionar soluciones interesantes para determinar las deformaciones superficiales terrestres. El software COSI-Corr ofrece esta opción con mayor facilidad y precisión (~1/20 píxeles) ya que la herramienta no requiere una medición externa como la GPS y se basa en el conocimiento topográfico y los datos auxiliares proporcionados por los sensores del satélite usado (Leprince et al., 2007). El principal flujo de trabajo de procesamiento de COSI-Corr consta de dos pasos básicos: Corregistro y correlación de subpíxeles. A continuación, se describe brevemente el procedimiento para lograr un corregistro preciso y recuperar información de deformación utilizando COSI-Corr.

1. Se definen los datos auxiliares (órbitas, altitudes del satélite, modelo de cámara y modelo de elevación digital a usar) de los metadatos de la imagen principal y secundaria, donde la imagen previa al evento de deformación se toma como imagen principal y la imagen secundaria es la imagen posterior al evento de deformación.

2. Luego se lleva a cabo la ortorrectificación de ambas imágenes para superponerlas con precisión.
3. Después del corregistro, se realiza la correlación seleccionando los parámetros de dicho proceso, como el tipo de correlacionador (Frecuencial o Estadístico), el tamaño de la ventana inicial y final (en píxeles) y el tamaño del paso (cambio entre dos ventanas deslizantes).
4. Finalmente, la correlación de las dos imágenes corregistradas y ortorrectificadas da como resultado una imagen compuesta por tres bandas que contiene los desplazamientos horizontales este-oeste (negativos hacia el oeste y positivos hacia el este), desplazamientos horizontales norte-sur (negativos hacia el sur y positivos hacia el norte) y la relación señal a ruido (SNR). La resultante de dos componentes horizontales será un vector que muestra la dirección y magnitud del movimiento de la superficie.

3.2 Adquisición de imágenes satelitales

La presente tesis se centra en el sensoramiento remoto y los procesos que conllevan a su desarrollo fueron posibles gracias a la disponibilidad de imágenes satelitales (ver tabla 6), proporcionados por la Comisión Nacional de Investigación y Desarrollo Aeroespacial (CONIDA) tanto para imágenes SPOT 6 (obtenidas a través de convenio con el IGP) y por la Agencia Espacial Europea (ESA), para imágenes Sentinel 2. Estos datos fueron adquiridos por medio de los sensores: NAOMI y MSI, a bordo de los satélites SPOT-6 y Sentinel 2, respectivamente. Las dos imágenes proporcionadas por el primer sensor son del 14 de julio del 2017 y del 3 de julio del 2019 (719 días de diferencia). Estas imágenes abarcan áreas aproximadas de 4202 Km^2 y 7179 Km^2 respectivamente y con dimensiones perimetrales aproximadas de 260 km para la primera imagen y 343 km para la segunda imagen. Una característica positiva de las imágenes SPOT 6 es que cuentan con alta resolución espacial (1 pixel = 1.5 m) en modo pancromático. Por otro lado, las imágenes proporcionadas por el sensor Sentinel 2, pertenecen a los años 2017, 2018 y 2019 con diferentes fechas de adquisición (ver Tabla 6). Todas estas imágenes comparten la misma extensión espacial aproximada de 12113 Km^2 y perímetro de 440 Km, son las que más extensión territorial abarcan y cuentan con una menor resolución espacial (1 pixel = 10 m). En la Figura 17, se muestra la ubicación y cobertura espacial de las imágenes satelitales adquiridas de los sensores mencionados.

Sensor	Satélites	Imagen	Fecha de Adquisición
NAOMI	SPOT 6	DIM_SPOT6_MS_201707141505414_ORT_SPOT6_20200206_18530514kwszj8sfs4f_1.XML	14-07-2017
		DIM_SPOT6_P_201707141505414_ORT_SPOT6_20200206_18530514kwszj8sfs4f_1.XML	
		DIM_SPOT6_MS_201907031525054_ORT_SPOT6_20200206_1632411vzfvh3b7ausg_1.XML	03-07-2019
		DIM_SPOT6_P_201907031525054_ORT_SPOT6_20200206_1632411vzfvh3b7ausg_1.XML	
MSI	SENTINEL 2	S2B_MSIL1C_20171108T153609_N0206_R068_T17MPQ_20171108T204317	08-11-2017
		S2B_MSIL1C_20171118T153609_N0206_R068_T17MPQ_20171118T202829	18-11-2017
		S2A_MSIL1C_20180701T153621_N0206_R068_T17MPQ_20180701T202318	01-07-2018
		S2B_MSIL1C_20180407T153619_N0206_R068_T17MPQ_20180407T202353	07-04-2018
		S2A_MSIL1C_20180412T153621_N0206_R068_T17MPQ_20180412T203704	12-04-2018
		S2A_MSIL1C_20180621T153621_N0206_R068_T17MPQ_20180621T204010	21-06-2018
		S2B_MSIL1C_20181123T153619_N0207_R068_T17MPQ_20181123T202732	23-11-2018
		S2B_MSIL1C_20190112T153619_N0207_R068_T17MPQ_20190112T185510	12-01-2019
		S2A_MSIL1C_20191213T153611_N0208_R068_T17MPQ_20191213T185829	31-07-2019
		S2B_MSIL1C_20190731T153629_N0208_R068_T17MPQ_20190731T202952	13-12-2019

Tabla 6. Imágenes multiespectrales (MS) y pancromáticas (P) obtenidas por los sensores NAOMI y MSI en los satélites SPOT 6 y Sentinel 2 respectivamente.

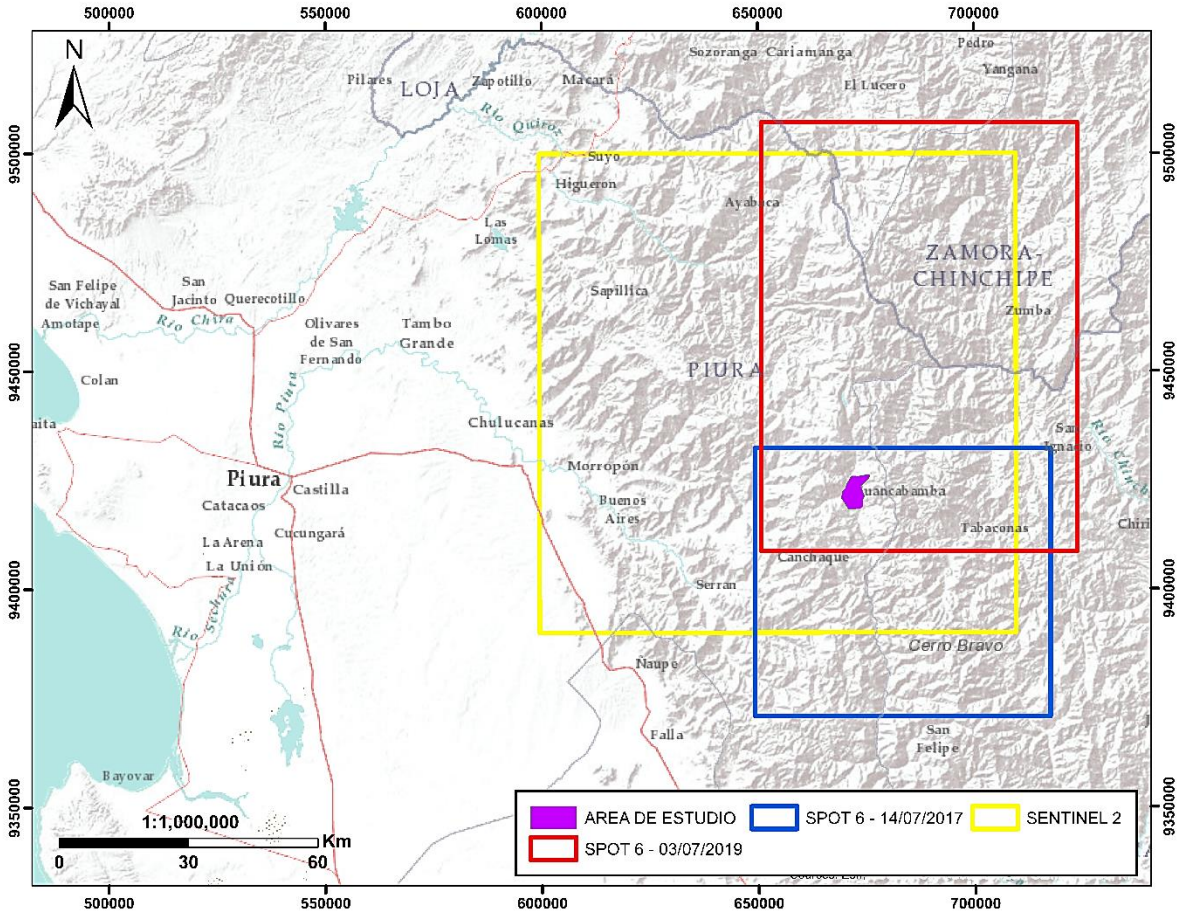


Figura 17. Zonas de adquisición de las imágenes satelitales. El polígono de color morado representa el área de estudio, mientras que el cuadro de color amarillo el área que cubren todas las imágenes descargadas de distintas fechas adquiridas por la plataforma Sentinel 2 y los cuadros de color azul y rojo representan las áreas cubiertas por las imágenes de la plataforma SPOT 6, perteneciente a las fechas de 14/07/2019 y 03/07/2019, respectivamente.

3.2.1 Características de imágenes Sentinel 2A y 2B

Sentinel 2 consta de dos misiones para capturar imágenes multiespectrales, teniendo como principal objetivo el monitoreo de la variabilidad de la superficie terrestre. Las misiones de Sentinel 2 están compuestas por el Instrumento Multi Espectral (MSI), que captura la información de la superficie terrestre en 13 bandas espectrales, con diferentes resoluciones espaciales, cuatro bandas de 10 m, seis bandas de 20 m y tres bandas con resolución de 60 m (ver tabla 7). El lanzamiento del Sentinel-2A se realizó el 23 de junio del 2015 y el del Sentinel-2B el 7 de marzo del 2017. El tiempo de revisita, estando ambos satélites operativos, es de 5 días. Los productos adquiridos por Sentinel 2 se encuentran divididos en teselas de 100x100 km y son productos de Nivel 1 (S2_MSI_L1C), **es** decir**,** las imágenes vienen con valores de reflectancias en el tope de la atmósfera (TOA) y georreferenciadas. En la tabla 7 se muestran las principales caracteristicas de estos satelites.

Órbita	Heliosincrónica (altitud de 786 km)		
Resolución temporal	5 – 10 días		
Tiempo de vida	7.25 años		
Ancho de barrido	290 km		
Resolución espectral (Longitud de onda central)/espacial	Banda 1	Costero Aerosol	443 nm / 60 m
	Banda 2	Azul	490 nm / 10 m
	Banda 3	Verde	560 nm / 10 m
	Banda 4	Rojo	665 nm / 10 m
	Banda 5	NIR 1	705 nm / 20 m
	Banda 6	NIR 2	740 nm / 20 m
	Banda 7	NIR 3	783 nm / 20 m
	Banda 8	NIR 4	842 nm / 10 m
	Banda 8A	NIR 5	865 nm / 20 m
	Banda 9	Vapor de agua	945 nm / 10 m
	Banda 10	Cirrus	1375 nm / 60 m
	Banda 11	Onda corta infrarroja 1 (SWIR)	1610 nm / 20 m
	Banda 12	Onda corta infrarroja 2 (SWIR)	2190 nm / 20 m
Resolución radiométrica	12 bits por pixel		

Tabla 7. Principales características de los satélites Sentinel 2.

3.2.2 Características de imágenes SPOT 6

El satélite SPOT 6, desde su lanzamiento en 2012 hasta la actualidad, se ha convertido en uno de los principales proveedores de imágenes ópticas satelitales de alta resolución. Esta plataforma está diseñada para lograr de manera eficiente tanto la recolección de una gran cobertura y de objetivos individuales. Estos datos ofrecen una fuente de información accesible para el monitoreo, análisis, pronostico, administración de recursos y actividades humanas en la Tierra. SPOT 6 está equipado con el sensor: Nuevo Instrumento Modular Óptico AstroSat (NAOMI), el cual permite la adquisición de ortoimágenes de alta calidad, así como imágenes satelitales de banda ancha como complemento de los datos de muy alta resolución. El detector presenta excelentes características (Tabla 8), que contribuyen significativamente al rendimiento óptico muy alto del instrumento (ESA, 2002).

Órbita	Heliosincrónica (altitud de 694 km)		
Resolución espacial	Pancromático: 1.5 m		
	Multiespectral: 6 m		
Resolución temporal	1 - 3 dias		
Tiempo de vida	10 años		
Ancho de barrido	60 km		
Resolución espectral	MS	Azul	454 – 519 nm
		Verde	527 – 587 nm
		Rojo	624 – 694 nm
		Infrarrojo cercano	756 – 880 nm
	P	Pancromático	455 – 744 nm
Resolución radiométrica	12 - 16 bits por pixel		

Tabla 8. Principales características del satélite SPOT-6/7. Adaptado de AIRBUS (2019).

3.2.3 Uso de DEM o DTM y DSM

Otro aspecto importante para el desarrollo de la presente tesis, es el uso de modelos digitales que representen visualmente y matemáticamente los valores de altura con respecto al nivel del mar y que permitan caracterizar las formas del relieve y los elementos u objetos presentes en el mismo. Para esto existen tres principales modelos digitales que cumplen con dichas demandas.

3.2.3.1 Modelo Digital de Elevación (DEM)

Un DEM es una matriz de celdas de tierra desnuda referida a un dato vertical. Las edificaciones creadas por el hombre (líneas eléctricas, edificios o torres) y naturales (árboles y otros tipos de vegetación) no están incluidos en un DEM y cuando se filtra puntos no terrestres como puentes y carreteras, se obtiene un DEM suave. Generalmente están representadas por imágenes en formatos GeoTiff y son muy útiles en hidrología, suelos y planificación territorial (GISGeography, 2020).

En el presente trabajo de investigación se utilizó un Modelo digital de elevación desarrollado en base a la tercera versión del ASTER Global DEM (ASTER GDEM), cubriendo superficies

terrestres entre 83° N y 83° S, y fue producido a través del procesamiento automatizado de 2,3 millones de escenas de archivos del satélite ASTER, el cual está fragmentado en teselas territoriales para su descarga. Este tipo de DEM cuenta con resolución espacial de 30 m y mosaicos de 1° x 1°.

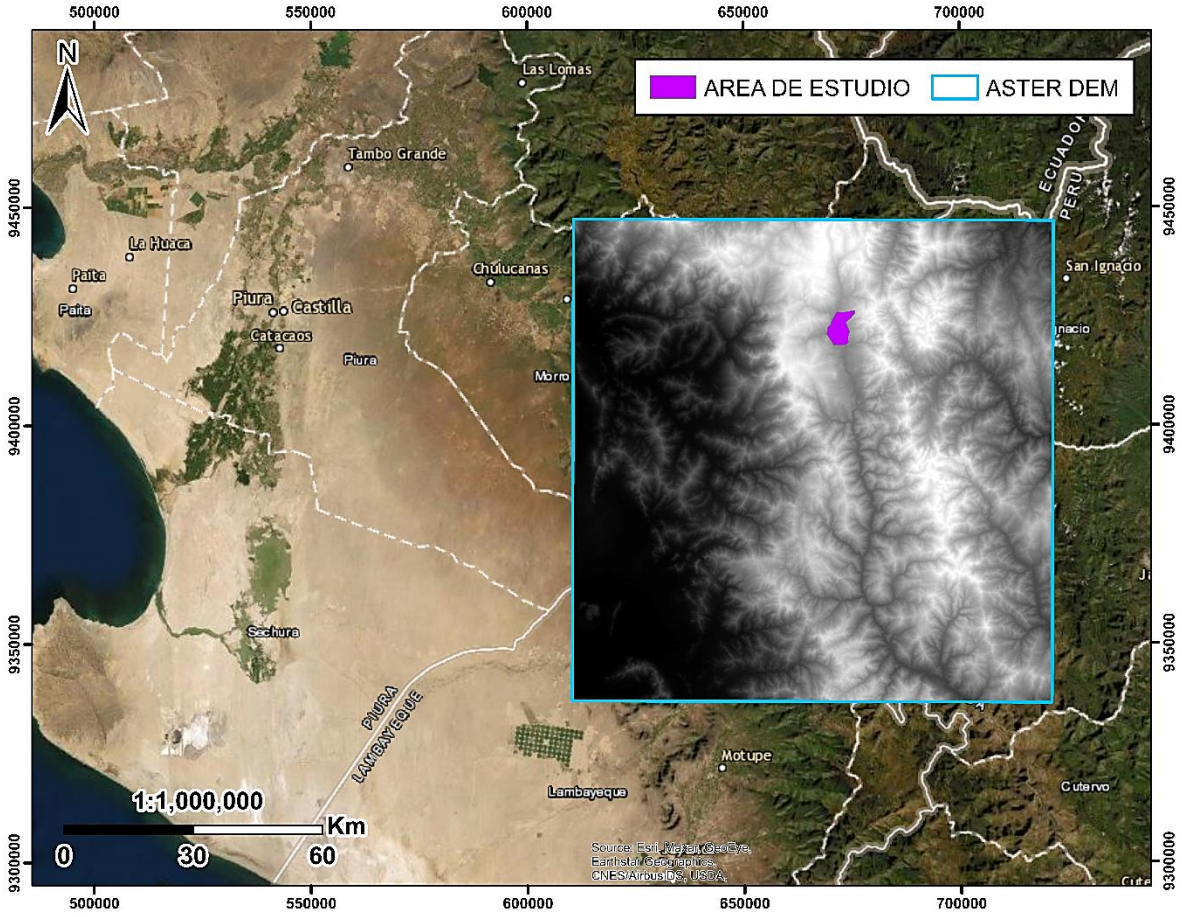


Figura 18. Zona de adquisición del ASTER DEM. El pequeño polígono morado representa el área de estudio, mientras que el cuadro de color celeste representa la extensión superficial del DEM, con área aproximada de 12234 Km^2 y perímetro de 442 Km.

3.2.3.2 Modelo Digital del Terreno (DTM)

Un DTM puede describirse como una representación tridimensional de una superficie del terreno consistente en coordenadas X, Y, Z almacenadas en forma digital. Incluye no sólo alturas y elevaciones, sino también otros elementos geográficos y características naturales como ríos, líneas de crestas, etc. En otras palabras, un DTM es un DEM que se ha aumentado algunos elementos como líneas de rotura y observaciones que no son los datos originales, que servirán para corregir los datos producidos utilizando sólo los datos primarios (GISResources, 2013).

3.2.3.3 Modelo Digital de Superficie (DSM)

Por otro lado, un DSM crea un relieve de la tierra incluyendo la vegetación, edificaciones y otros objetos presentes, a comparación de un DEM o DTM que solamente muestra el relieve de la superficie terrestre ("Suelo desnudo"). En la Figura 19 se observa una sección de una imagen digital en donde se compara un DTM y un DSM.

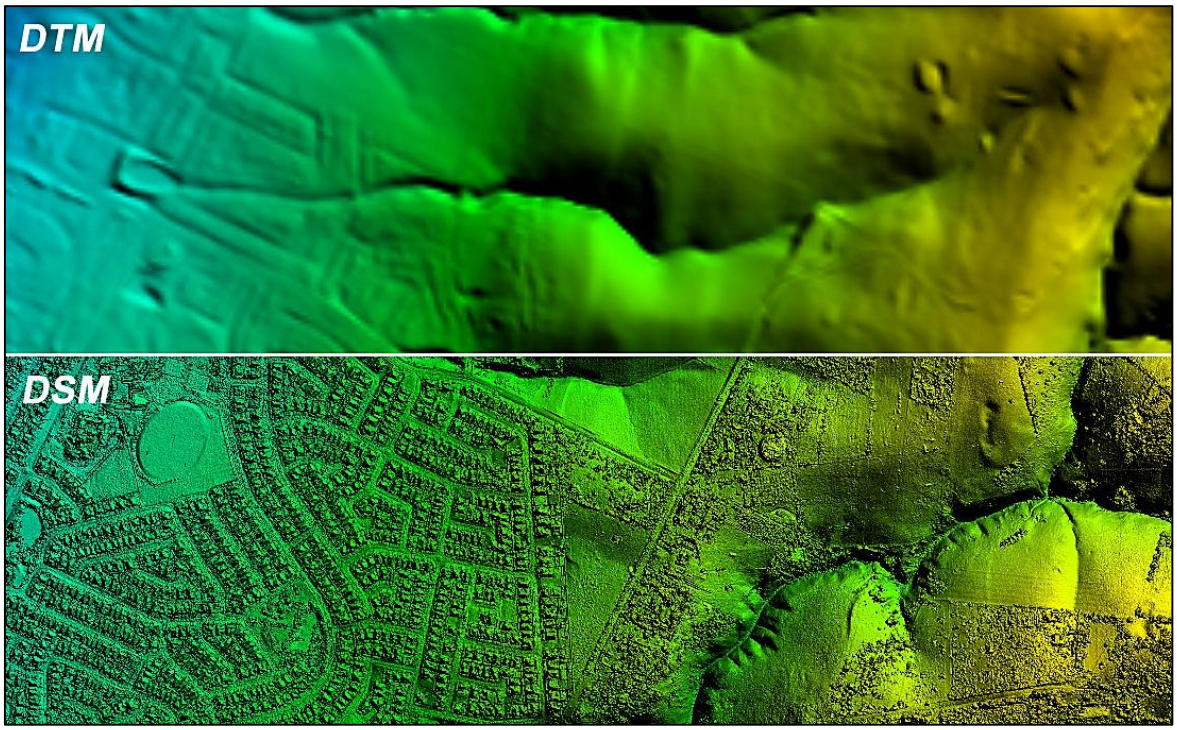


Figura 19. Ejemplo de la diferencia visual entre un Modelo Digital de Terreno (DTM) y un Modelo Digital de superficie (DSM). Principalmente en una de ellas se denota las edificaciones y vegetación presente en la superficie terrestre (GISResources, 2013).

Ya explicada las diferencias de cada modelo digital, hay que recalcar que en el presente estudio se utilizó un DEM ASTER (noviembre del 2013), como imagen base, para la elaboración de los mapas de elevaciones y los mapas de desplazamientos, que están presentes en las secciones posteriores a esta y en los apéndices. También se empleó para correlacionar las alturas presentes en cada resultado, con las magnitudes de los desplazamientos estimados. Por otro lado, se usó de forma indirecta un DSM para la ortorrectificación de las imágenes SPOT 6, esto quiere decir que la ortorrectificación fue desarrollado por la entidad que proporcionó dichos datos y no en la presente investigación. De esta forma, ya no fue necesario realizar una nueva ortorrectificación a las imágenes, pero con esto se evita obtener una mayor precisión en las mediciones.

3.3 Preprocesamiento de imágenes

Las imágenes obtenidas por cualquier tipo de satélite siempre traen consigo ruido y elementos que alteran su interpretación y análisis. Estos comúnmente son producidos por fallas en los sensores a bordo de los satélites o por las condiciones climáticas presentes en las zonas donde se capturaron las imágenes. Estas distorsiones son una gran desventaja para el análisis inmediato de las características espectrales de las imágenes, ya que sin una corrección adecuada puede conducir a la obtención de falsos resultados. Las imágenes de las plataformas SPOT-6 (proporcionadas por CONIDA) y Sentinel 2, normalmente son ortorrectificadas al momento de su adquisición, pero la principal diferencia entre ambos tipos de imágenes es que, las de la plataforma SPOT 6 fueron ortorrectificadas usando un DSM mientras que las imágenes Sentinel 2 fueron ortorrectificadas con un DTM. Esto es muy importante para el desarrollo de las pruebas de correlación y la posterior adquisición de resultados, ya que las imágenes SPOT 6 fueron usadas para el análisis especifico de las deformaciones superficiales dentro de la ciudad, mientras que las imágenes Sentinel 2 para zonas externas a la ciudad de Huancabamba, pero dentro del área de estudio. Las características de las imágenes obtenidas, también permite que sus diferentes temporalidades no tengan un desfase espacial entre ellas, evitando así la aplicación de una nueva corrección geométrica. Otras correcciones con que cuentan las imágenes son la corrección atmosférica y radiométrica, pero con un nivel de procesamiento básico.

Aunque la metodología de COSI-Corr dicta que no es necesario aplicar correcciones radiométricas y atmosféricas antes de desarrollar las pruebas de correlación, en este estudio se aplicó dichas correcciones empleando el software ENVI 5.3., solo para dar un mejor nivel de visualización panorámica principalmente a las imágenes que cuentan con nubes o presencia de residuos dejados por eventos atmosféricos y obstruyen la información visual y su contenido superficial. Para estos fines se usó la herramienta *Radiometric Calibration* que permite ingresar las bandas de la imagen y el metadato de cada una de estas, realizando así la corrección radiométrica y la conversión a reflectancia de la superficie. Luego se realizó la corrección atmosférica por el método *Dark Subtraction*, el cual consiste en eliminar los efectos de la dispersión atmosférica de una imagen restando un valor de píxel que represente una firma de fondo de cada banda. Este valor puede ser el mínimo de la banda, un promedio basado en una región de interés (ROI) o un valor que se especifique. Esto dos procesos usados para realizar las correcciones respectivas, son automáticos y solo se necesitan los datos de entrada adecuados

para cada uno de ellos. Todos estos procesos fueron desarrollados de forma automática, ya que los algoritmos están implementados en el mismo software. Principalmente la aplicación de estas correcciones se utilizó para complementar la elaboración de los mapas que serán expuestos más adelante en las secciones de resultados y apéndices.

3.4 Corregistro y ortorrectificación

Para el corregistro y la ortorrectificación de imágenes, se trabajó con imágenes pancromáticas de SPOT 6 (1.5 m) e imágenes de la octava banda (10 m) de Sentinel 2, con alto nivel de resolución espacial a diferencia de otras plataformas como ASTER, Landsat, etc., que tienen muy baja resolución espacial (15m o 30 m). Esta característica contribuirá a un mejor procesamiento de correlación y obtención de mejores resultados, tanto a nivel visual como en magnitudes.

Algo importante que denotar es que el software COSI-Corr es aplicable solo a imágenes satelitales de barrido ASTER, SPOT 4, 5, 6 y 7, Pléiades y Quickbird. Esto en parte se debe a que se trabajó con la versión 5.3 del software ENVI, la cual no cuenta con un algoritmo para la visualización de imágenes de este tipo de sensor y recordar que COSI-Corr, se instala dentro de ENVI, a modo de *plugin*. Entonces para solucionar este inconveniente, se utilizó el software de código abierto SNAP (Sentinel Application Platform) para visualizar los datos Sentinel 2 y guardarlos en formato GeoTiff para luego ser usados en los procesos de correlación del software COSI-Corr, el cual si admite este tipo de formato. SNAP fue desarrollado por la Agencia Espacial Europea (ESA) y está disponible en su página web.

El proceso de corregistro no es más que la introducción de parámetros y metadatos para una correcta ortorrectificación de las imágenes. Las dificultades para registrar con precisión las imágenes satelitales pueden deberse al cambio continuo de altitud del satélite, a los errores del modelo de elevación digital (DEM) usados y al remuestreo inexacto, por lo que el proceso de ortorrectificación soluciona estos problemas (Leprince, et al., 2007). Se utiliza el sistema de coordenadas Universal Transversal de Mercator (UTM) para exhibir las imágenes en un sistema de referencia común independiente de la geometría de visualización del sensor para el registro conjunto de imágenes. Para el corregistro de las imágenes y posterior ortorrectificación, el software COSI-Corr hace uso de los principales parámetros y subprocesos:

a) Archivos auxiliares

Este tipo de archivos contienen las posiciones y las direcciones de observación del satélite, el número de filas y columnas de pixeles en las imágenes, la resolución nominal del suelo, el acimut solar y las elevaciones. Estos datos fueron extraídos de los archivos DIM_xxxx.xml, pertenecientes a las imágenes pancromáticas o multiespectrales.

b) Selección de Puntos de Control de Tierra (GCP)

De forma opcional se puede generar archivos con GCP para refinar la geolocalización y el corregistro de la imagen previo al proceso de ortorrectificación. Los GCPs se definen con campañas de GPS o tomando puntos de enlace entre la imagen y una referencia geolocalizada (imagen ortorrectificada, DEM, mapa digitalizado de alta resolución, etc.). Los puntos con mayores magnitudes de la raíz del error cuadrático medio (RMSE) se eliminan y los puntos restantes se guardan en un archivo de texto. Posteriormente, estos se convierten a GCP y se guardan como un archivo de texto para que finalmente los GCP se optimicen por medio de un motor de correlación de remuestreo (De frecuencia o estadístico) y un núcleo de remuestreo (Sinc, Bilineal o Bicúbico), de esta forma se obtiene una mejor inscripción conjunta y eventualmente una correlación (François Ayoub et al., 2017).

c) Ortorrectificación y remuestreo

Las imágenes SPOT 6 y Sentinel 2, cuentan con procesos de ortorrectificación ya aplicado y pueden ser usadas de forma directa en el proceso de correlación subpíxel. Muchas veces, para tener resultados más precisos haciendo uso de COSI-Corr, generalmente se opta por adquirir imágenes ópticas estereoscópicas, así de esta forma se crea modelos digitales de elevación de las mismas imágenes y se pasa luego a la ortorrectificación utilizando los DEMs generados. Entonces de esta forma los resultados que se obtienen, luego de aplicar la correlación de imágenes, son más precisos. Por ejemplo, Lacroix et al (2015) y Bontemps et al (2018), siguieron esta metodología y obtuvieron resultados similares para estudios de detección de deslizamientos realizado en la ciudad de Maca (departamento de Arequipa), en el cual usaron imágenes ópticas estereoscópicas de la plataforma Pléiades 1 y 2.

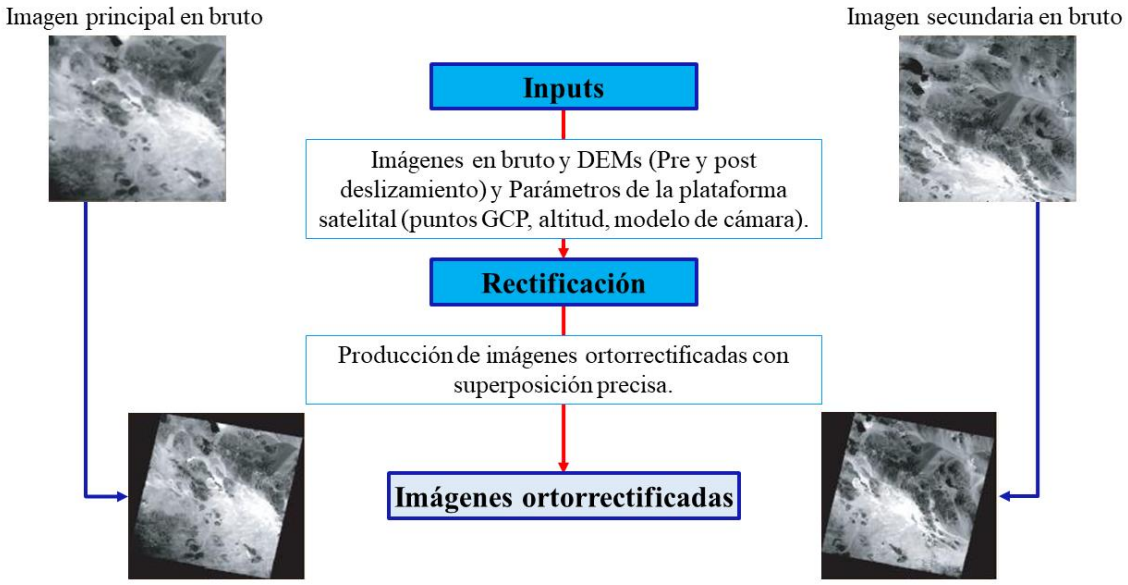


Figura 20. Diagrama de flujo de los procesos para la obtención de imágenes ortorrectificadas. Adaptado de CALTECH (2004).

3.5 Correlación subpíxel

La correlación subpíxel de COSI-Corr está basada en el uso de la función de correlación cruzada normalizada (CCN), la cual proporciona desplazamientos horizontales de la superficie terrestre a través de un proceso iterativo de estimación del plano de fase en el dominio de Fourier. Este proceso conduce a una imagen compuesta por dos bandas que representan los componentes de los desplazamientos horizontales Este-Oeste y Norte-Sur, con precisiones que dependen de las medidas de las ventanas de correlación inicial y final, por ejemplo una precisión de ~1/20 del tamaño de píxel es generada por ventanas de tamaño de 32x32 (Leprince et al., 2007). COSI-Corr ofrece dos tipos de correlación: Estadística y de frecuencia.

3.5.1 Correlación estadística

Este tipo de correlación se basa en la elección de una ventana en la imagen principal, la cual calculará los coeficientes de correlación con una ventana móvil correspondiente a la imagen secundaria. Este correlacionador maximiza los valores absolutos de los coeficientes de correlación, convirtiéndola en una técnica robusta de su tipo, pero no tan precisa en comparación con el otro tipo de correlación (Meijer, 2015).

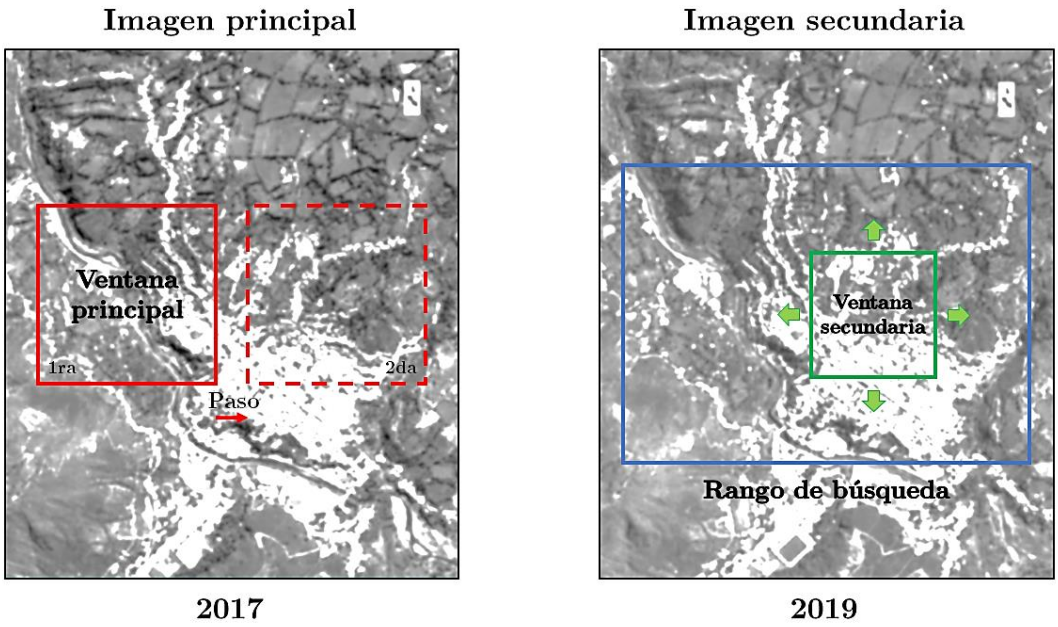


Figura 21. Esquema del proceso de correlación estadística, en donde se compara los coeficientes de correlación de la ventana principal y secundaria. Esto ocurre dentro de un rango de búsqueda en la imagen secundaria. La posición de la siguiente ventana está determinada por el tamaño del paso. Adaptado de Meijer (2015).

3.5.2 Correlación por frecuencia

Consta de dos subprocesos basados en el uso de la Transformación Rápida de Fourier (TRF) bidimensional, lo cual correlaciona la ventana inicial y final en el dominio de la frecuencia, basándose en la diferencia de fase de dichas ventanas, de este modo se determina también, el máximo valor de la correlación cruzada. El primero subproceso es la estimación aproximada de desplazamientos a nivel de píxeles por parte de la ventana inicial, mientras que en el segundo subproceso se mide los desplazamientos a nivel subpíxel, a través de un movimiento de barrido por parte de la ventana final (Figura 26). Este tipo de correlación es más preciso que la descrita anteriormente, pero tiene la desventaja de ser más sensible al ruido.

A pesar que la ventana final, realiza el barrido dentro de la ventana inicial, aún puede correlacionar áreas que están fuera de la ventana TRF inicial, cuando hay poco contraste en la imagen utilizada. El correlacionador por frecuencia utiliza una máscara para establecer el umbral de la amplitud del espectro logarítmico y así reducir el ruido (Meijer, 2015). A este parámetro o índice, también se le conoce como umbral de enmascaramiento y sus valores oscilan entre 0 y 1.

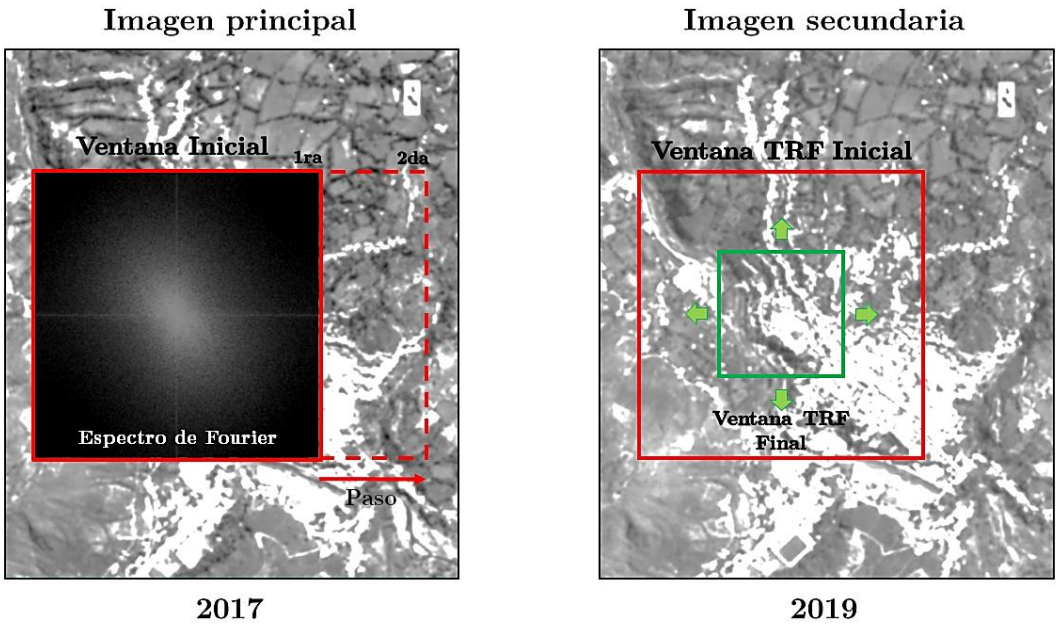


Figura 22. Proceso de correlación por frecuencia, en donde se calcula la Transformación Rápida de Fourier (TRF) bidimensional a partir de las ventanas iniciales en la imagen principal y secundaria, dando como resultado un desplazamiento en la escala de píxeles. Mientras que los desplazamientos a escala subpíxel son estimados a partir del barrido de ventana TRF final dentro de la Ventana TRF inicial. Adaptado de Meijer (2015).

Un análisis comparativo entre ambos tipos de correlaciones, lo desarrolla Yassen (2009) en su tesis de maestría, en donde los aplica para un estudio de la estimación de deformación de suelos y concluye que el correlacionador de frecuencia de COSI-Corr ofreció los mejores resultados. Por otro lado, Ayoub et al (2017) recomiendan el correlacionador estadístico para procesar imágenes que tengan mayor ruido óptico.

Recapitulando lo detallado en las secciones 3.5.1 y 3.5.2, el correlacionador de frecuencia está basado en análisis de Fourier y es más preciso que el estadístico, pero no tan robusto para tratar imágenes con mayor ruido óptico. En la presente tesis se hace uso de la correlación de frecuencia aplicado a las imágenes SPOT 6 y Sentinel 2.

3.5.3 Parámetros de correlación

Una vez elegido el tipo de correlación a usar, se debe especificar las magnitudes de los parámetros de correlación (de entrada), como tamaños de ventana inicial y final, tamaños de paso entre las dos ventanas y valores umbral de enmascaramiento.

La ventana inicial proporciona la estimación del desplazamiento en píxeles entre las dos imágenes utilizadas, mientras que la ventana final calcula el desplazamiento de subpíxeles entre

dichas imágenes. (Los tamaños de ambas ventanas se miden en pixeles y están en potencia de dos). El paso nos indicará el espacio de separación, en píxeles, entre dos ventanas deslizantes (inicial y final), si su valor es mayor o igual que el tamaño final de la ventana, todas las mediciones se efectuarán de forma independiente. Por otro lado, los valores de umbral permiten enmascarar las frecuencias de acuerdo con la amplitud del espectro cruzado logarítmico (Espectro de Fourier). Según Leprince et al (2007), un valor cercano a la unidad es apropiado en la mayoría de los casos. En la Figura 23 se presenta un diagrama con los dos principales procesos del método COSI-Corr y los principales parámetros utilizados en su desarrollo.

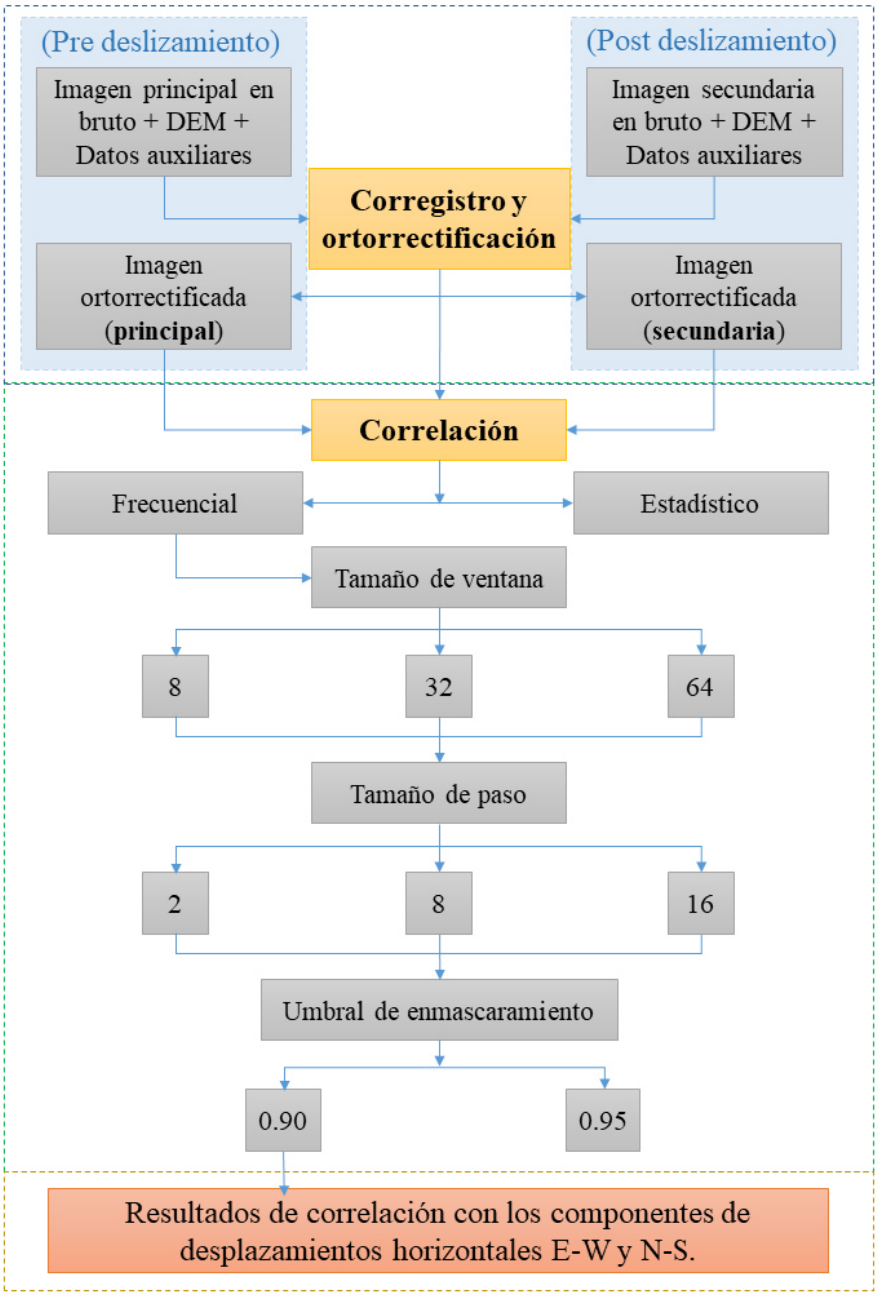


Figura 23. Diagrama de flujo de trabajo que muestra los principales procesos y parámetros utilizados por el software COSI-Corr. Adaptado de Yaseen (2009).

3.6 Estimación de desplazamientos resultantes.

Luego de obtener las imágenes con bandas de desplazamientos horizontales (E-W y N-S), también existe la opción de aplicar algunas herramientas de mejora para deshacerse de los errores de procedimiento. Por ejemplo, *Destripe Image*, la cual sirve para la eliminación de rayas generadas luego de la correlación o también *Discard/Replace Image Values,* la cual se utiliza para filtrar valores de desplazamientos específicos (Ayoub et al., 2017).

Después de aplicar opcionalmente las diferentes herramientas de mejora, se usa la imagen correlacionada final, que contiene las dos bandas de desplazamientos horizontales para medir el desplazamiento resultante o acumulativo dentro y en las afueras de la ciudad. Esto se lleva cabo mediante la aplicación de la ecuación 13 para hallar el módulo del vector de dos componentes (E-W y N-S)

$$D_R = \sqrt{(D_{EW})^2 + (D_{NS})^2} \qquad (13)$$

Donde

D_R = Desplazamiento Resultante o acumulativo.

D_{EW} = Desplazamiento horizontal en Este-Oeste.

D_{NS} = Desplazamiento horizontal Norte-Sur.

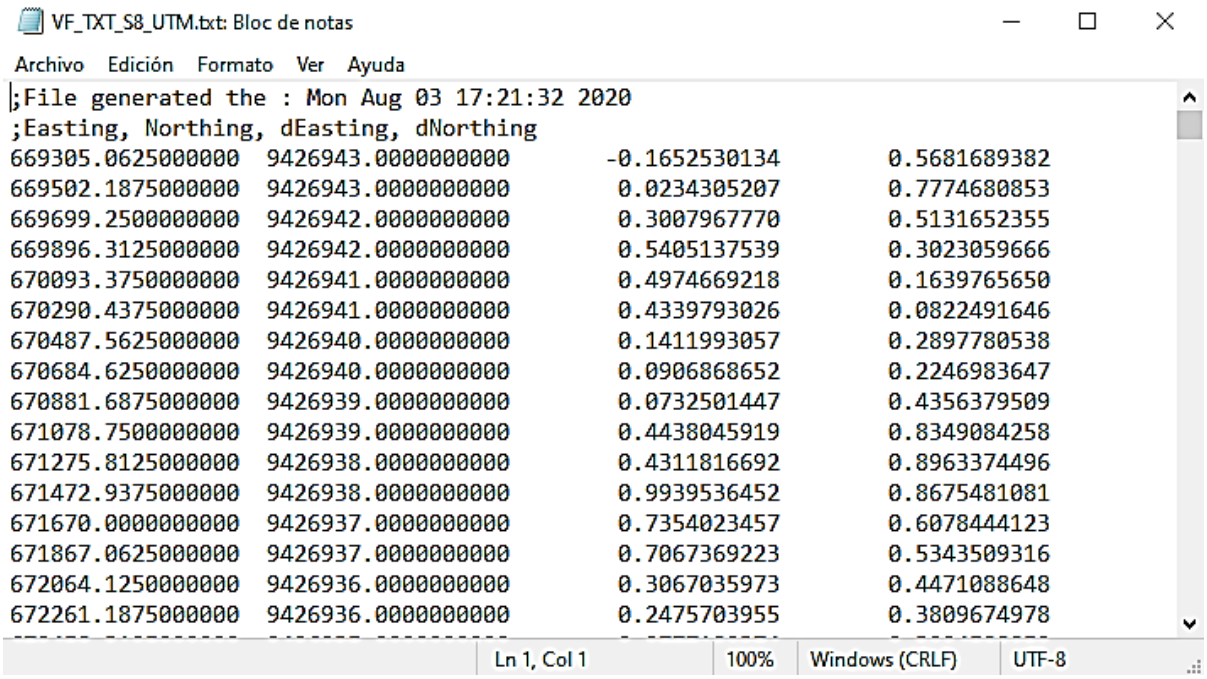
Los valores de desplazamiento, tanto de los componentes E-W, N-S y los desplazamientos acumulativos, se guardan como un archivo de texto (ASCII) (ver Figura 24) para su posterior análisis y comparaciones. Estos resultados pueden extraerse en el sistema de coordenadas geográficas que más se ajuste a la necesidad del estudio.

3.7 Campo vectorial de desplazamiento

Otra herramienta importante de análisis con que cuenta COSI-Corr es *Vector Field*, la cual permite la representación gráfica de los vectores de desplazamientos. Los vectores muestran la orientación de propagación de los desplazamientos estimados en zonas específicas, pero no representan en escala dichos desplazamientos, debido a esto se debe usar la barra de colores de la interpolación de los desplazamientos, para interpretar la magnitud de dichos movimientos.

Estos datos también pueden ser guardados en un archivo de texto, el cual está compuesto por cuatro columnas de datos: las dos primeras columnas son de las coordenadas de cada resultado hallado (desplazamientos) y las dos últimas columnas son las magnitudes de las componentes *dE* y *dN*, de los desplazamientos resultantes (ver figura 24).

Estos archivos de texto son la base para la construcción de mapas y posteriores procesamientos finales como la interpolación para la representación gráfica de los desplazamientos, mediante escala de colores de las zonas que han presentado deformación superficial terrestre. Posteriormente estos resultados también son utilizados para poder estimar las velocidades de desplazamiento respecto a una ventana temporal especifica Los parámetros de visualización como título, número de vectores, color, grosor de línea y entre otros, se pueden personalizar dentro de esta herramienta. Las características del vector, como el promedio de ventana, el tamaño de paso entre dos de ellos, el grosor de la flecha y la escala, se pueden ajustar para una mejor presentación de los resultados.


VF_TXT_S8_UTM.txt: Bloc de notas

Archivo Edición Formato Ver Ayuda

```
;File generated the : Mon Aug 03 17:21:32 2020
;Easting, Northing, dEasting, dNorthing
669305.0625000000  9426943.0000000000       -0.1652530134        0.5681689382
669502.1875000000  9426943.0000000000        0.0234305207        0.7774680853
669699.2500000000  9426942.0000000000        0.3007967770        0.5131652355
669896.3125000000  9426942.0000000000        0.5405137539        0.3023059666
670093.3750000000  9426941.0000000000        0.4974669218        0.1639765650
670290.4375000000  9426941.0000000000        0.4339793026        0.0822491646
670487.5625000000  9426940.0000000000        0.1411993057        0.2897780538
670684.6250000000  9426940.0000000000        0.0906868652        0.2246983647
670881.6875000000  9426939.0000000000        0.0732501447        0.4356379509
671078.7500000000  9426939.0000000000        0.4438045919        0.8349084258
671275.8125000000  9426938.0000000000        0.4311816692        0.8963374496
671472.9375000000  9426938.0000000000        0.9939536452        0.8675481081
671670.0000000000  9426937.0000000000        0.7354023457        0.6078444123
671867.0625000000  9426937.0000000000        0.7067369223        0.5343509316
672064.1250000000  9426936.0000000000        0.3067035973        0.4471088648
672261.1875000000  9426936.0000000000        0.2475703955        0.3809674978
```

Ln 1, Col 1 | 100% | Windows (CRLF) | UTF-8

Figura 24. Ejemplo de archivo de texto con los resultados de la correlación S32x32_s16_T90.

3.8 Interpolación de resultados

La representación gráfica de los resultados se realiza mediante la aplicación de interpolación de datos. Para este caso se usó la interpolación de Kriging con modelo de semivarianza gaussiana, debido a que contribuye a un análisis más elaborado y cuenta con un fundamento

geoestadístico. Este tipo de interpolación es muy apropiado cuando hay una cantidad elevada de datos. También provee, a partir de una muestra de puntos, ya sean regular o irregularmente distribuidos, valores estimados de aquellos sitios donde no hay información, sin sesgo y con una varianza mínima conocida. Cuando el distanciamiento entre dos puntos es muy grande, los variogramas no son posibles de obtener, entonces la interpolación de Kriging deja de ser una opción y comparativamente el método de Ponderación de Distancia Inversa (IDW) se perfila como el mejor para esos casos (ESRI, 2016). Un ejemplo de interpolación IDW, se observa en el apéndice D, en donde se interpoló de estimaciones geodésicas de estaciones distribuidas aleatoriamente en el área de estudio.

La interpolación de Kriging es similar a la interpolación IDW, por lo que pondera los valores medidos circundantes para calcular una predicción de una ubicación sin mediciones. La fórmula general para ambos interpoladores se forma como una suma ponderada de los datos:

$$\widehat{\mathcal{K}}_j = \sum_{i=1}^{N} \lambda_i \mathcal{K}_i \qquad (14)$$

Donde
$\mathcal{K}_j$ = Valor estimado para el punto j.
λ_i = Ponderación desconocida para el valor medido en la ubicación i.
$\mathcal{K}_i$ = Valor en el punto i.
N = Cantidad de puntos utilizados en la interpolación.

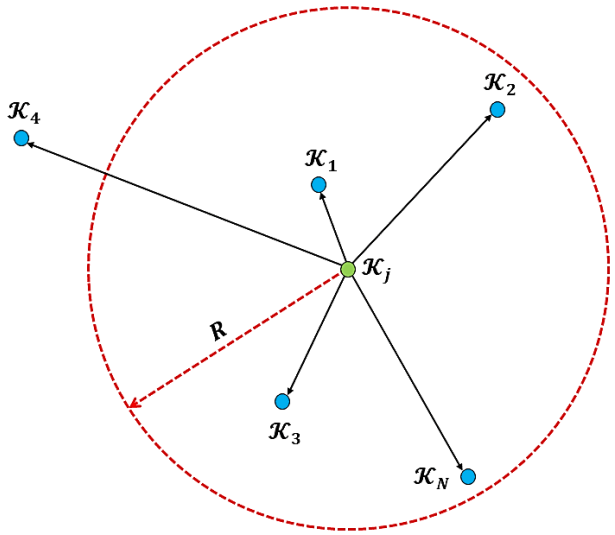


Figura 25. Estimación del valor de puntos con el interpolador Kriging.

En la Figura 25 se ilustra una circunferencia de radio R (vecindad para la predicción de datos), donde el valor del punto a estimar es $\mathcal{K}_j$. Son considerados los valores de los puntos $\mathcal{K}_1$, $\mathcal{K}_2$ y $\mathcal{K}_3$ que se encuentran dentro la vecindad, pero no se considera el punto $\mathcal{K}_4$ ya que está fuera del radio de predicción.

La interpolación de Kriging ajusta una función matemática a una cantidad especificada de puntos o a todos los puntos dentro de un radio específico para determinar el valor de salida para cada ubicación. Este tipo de interpolación cuenta con varios subprocesos, entre los que se incluyen, el análisis estadístico exploratorio de los datos, el modelado de variogramas, la creación de la superficie y (opcionalmente) la exploración de la superficie de varianza. Por otro lado, la interpolación de Kriging es más adecuada cuando se sabe que hay una influencia direccional o de la distancia correlacionada espacialmente en los datos y se utiliza a menudo en las ciencias del suelo (ESRI, 2016). Los algoritmos de los procesos y subprocesos de la interpolación de Kriging están implementados en al software ArcGIS 10.5, el cual también fue usado para la elaboración de mapas en la presente tesis.

3.9 Estimación del RMSE

La Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE) es una medida utilizada para evaluar predicciones numéricas y es una de las herramientas estadísticas más utilizadas en los Sistemas de Información Geográfica (SIG). La RMSE es una buena medida de precisión, pero solo para comparar errores de predicción de diferentes modelos para una variable en particular y no entre variables. En otras palabras, la RMSE mide la cantidad de error que hay entre dos conjuntos de datos y compara un valor predicho y un valor observado o conocido. Su resultado tiene las unidades de las variables medidas y pondera los pronósticos que están más alejados del valor medido (Camarillo-Peñaranda et al., 2013).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(P_i - O_i)} \qquad (15)$$

Donde

P_i = Valores Previstos (Mediciones GPS).
O_i = Valores Observados (Resultados COSI-Corr).
n = Cantidad total de valores.

Capítulo 4

Resultados

4.1 Ensayos previos para descarte de imágenes

Algo importante a tener en cuenta es que las principales características que deben tener las imágenes satelitales para desarrollar una mejor correlación subpíxel, son la baja resolución espacial y que tengan un buen nivel de ortorrectificación en base a un DTM o DEM (ver sección 3.2.3). Pero en este estudio, al no contar con imágenes que tengan ambas características, se procedió a realizar ensayos rápidos de correlación, con la finalidad de definir qué tipo de imágenes sin estas características, son las más adecuadas para efectuar las pruebas de correlación subpíxel y que ofrezcan resultados más exactos y congruentes a otros estudios realizados dentro del marco del proyecto general "*Evaluación Geodinámica, Geofísica Y Geología De Los Deslizamientos De Tierra Que Afectan La Seguridad Física De La Ciudad Huancabamba (Piura)"*, en donde también se desarrolló la presente investigación.

De este modo los ensayos rápidos se realizaron con imágenes de las plataformas ASTER, Landsat, SPOT 6 y Sentinel 2. En consecuencia, se fue descartando en base a los resultados, que tipo de imágenes eran las más apropiadas para el desarrollo de las pruebas de correlación subpíxel en base a la metodología descrita en el capítulo 3, resultando las dos últimas plataformas (SPOT 6 y Sentinel 2) las mejores en su tipo, para el desarrollo de la presente investigación. Los resultados de estos ensayos rápidos demostraron que las imágenes satelitales ASTER y Landsat, no son apropiadas para la aplicación de la metodología descrita en el capítulo 3, ya que, a pesar de tener un amplio catálogo temporal de imágenes (> 1985), lo cual permitiría un mejor análisis y reporte historio de los desplazamientos en la zona de estudio, contaban con una resolución espacial muy alta (15 m a 90 m), en consecuencia jugaba un papel muy negativo a la hora de aplicar la metodología. Esto se demostraba en las tasas de desplazamientos obtenidos (~ >80 m), las cuales eran absurdas aun usando imágenes con separación temporal muy elevada (de 20 a 30 años), comparado a otros estudios, como por ejemplo el de Bontemps et al (2018), en el cual utilizan una metodología similar pero con una extensión temporal de imágenes de la zona de la ciudad de Maca (Arequipa) que abarca 27

años (1986-2013), encontrando tasas máximas de desplazamiento de hasta 35 m. Por otro lado, también se contaba con imágenes SPOT 6 de la zona de Maca y sus alrededores. Estas imágenes sirvieron para corroborar la efectividad del software COSI-Corr, mediante el desarrollo de una prueba de correlación subpíxel y comparar visualmente los resultados de los estudios realizados por Lacroix et al (2015) y Bontemps et al (2020). Los resultados mostraron la delimitación de la principal zona de deslizamiento de tierra presente en las cercanías de dicha ciudad y la cual concuerda con los resultados obtenidos por los estudios mencionados (ver Figura c en apéndice G). De esta forma se demostró rápidamente la efectividad del método y del software COSI-Corr, definiendo así también los tipos de imágenes y parámetros base (formato, tamaño y bandas) para el desarrollo de las pruebas de correlación subpíxel (ver tabla 9).

Finalmente, en base a los ensayos previos, al tipo de ortorrectificación y a la baja resolución espacial, las pruebas con imágenes SPOT 6 serán destinados al reconocimiento más específico de las deformaciones superficiales en la ciudad de Huancabamba. Por otro lado, como las imágenes Sentinel 2 tienen una ortorrectificación basada en Modelos Digitales de Terreno (DTM) y presentan una resolución espacial de 10 m, entonces estas imágenes serán designadas para la identificación de zonas de mayor extensión territorial (externas a la ciudad).

4.2 Pruebas de correlación subpíxel

Si bien los mejores resultados del análisis de correlación de imágenes aplicado a deslizamientos de tierra se obtienen con imágenes que tengan una gran extensión de separación temporal, en este estudio también se han efectuado pruebas con ventanas temporales muy cortas (5 y 10 días), con el propósito de analizar y correlacionar la gran variedad de resultados, tanto de las magnitudes como de la orientación del campo vectorial para la identificación de las zonas de mayor deformación superficial. La realización de una gran variedad de pruebas contribuyó a definir y discriminar, entre todos los parámetros de entrada (sección 3.5.3), los más adecuados para su desarrollo. En total se efectuaron 23 pruebas (ver tabla 9), de las cuales se eligieron solo 2 (NQ1 y NP12) por cumplir con dos condiciones principales: Tener los valores más bajos de RMSE (figura 26) y por presentar resultados congruentes a los estudios morfodinámicos y geodésico (En la Sección 4.8, se analiza más detalladamente estas condiciones).

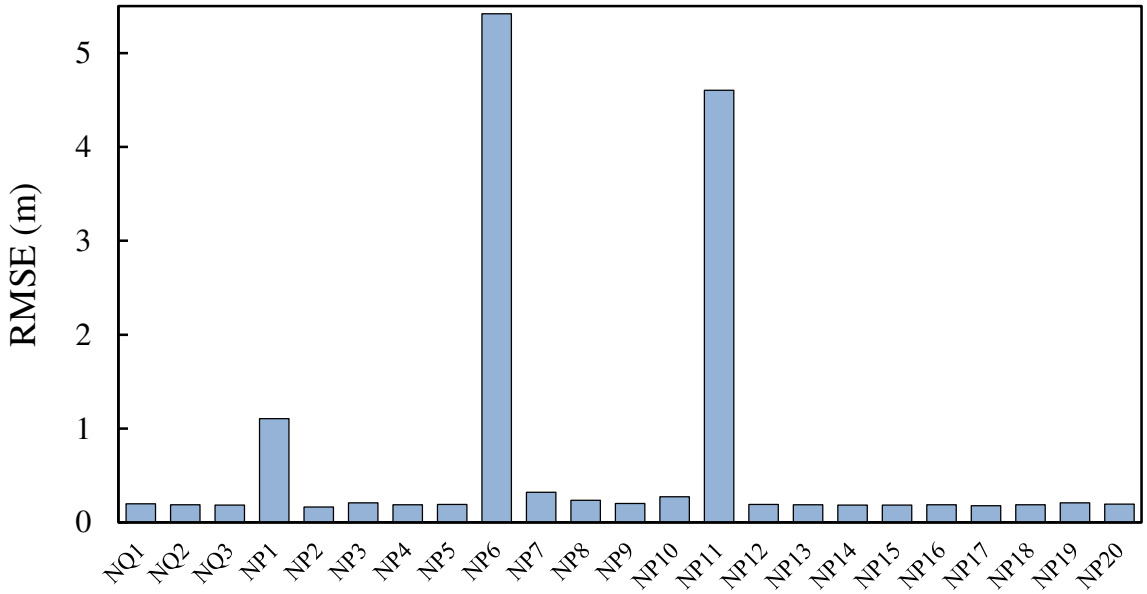


Figura 26. Estimaciones de la RMSE de todas las pruebas de correlación subpíxel. Las pruebas NP1, NP6 y NP11, presentan valores muy elevados, lo cual llevó a sus descartes inmediatos para el análisis posterior de sus resultados.

En la tabla 9 se presentan los datos de entrada y algunas de sus características, que se usaron en las 23 pruebas de correlación, donde tres se realizaron con imágenes SPOT 6 y las restantes con imágenes Sentinel 2. Luego, con los resultados obtenidos se procedió a seleccionar, comparar y validar las pruebas con resultados que contengan menor error respecto a los desplazamientos GPS calculados por el estudio geodésico de Villegas-Lanza et al (2019) y morfodinámicos (A. Córdova, 2018; N. Córdova, 2019; Villegas-Lanza et al., 2018), desarrollados dentro del marco general del proyecto. Esto también considera el aspecto temporal de los estudios base para la validación, es decir si el estudio GPS abarca un lapso temporal desde 10 al 29 de julio (19 días) en el año 2018, entonces se buscó los resultados de las pruebas de correlación de imágenes ópticas, que estén más cercanas a esas fechas para así comparar ambos resultados y analizar la diferencia entre ellos y de la misma forma se desarrolló para el estudio morfodinámico.

La diferencia temporal en cada prueba es muy importante, ya que mientras mayor sea el tiempo de separación de la imagen principal y secundaria, mejores serán los resultados tanto en las magnitudes de los desplazamientos, velocidades, ubicación y delimitación de zonas con deformaciones en la superficie terrestre. La etimología general del tipo de prueba, como se observa en la tabla 9, es la siguiente: $\boldsymbol{S}(I)x(F)_\boldsymbol{s}(p)_\boldsymbol{T}(t)$. El parámetro $\boldsymbol{S}$, representa las dimensiones (en pixeles) de la ventana inicial *(I)* y final *(F)* de correlación pixel y subpíxel respectivamente (ambas de forma cuadrada), luego $\boldsymbol{s}$ es el tamaño del paso (separación entre

ambas ventanas), en donde *p* simboliza su magnitud (en pixeles) y finalmente el parámetro ***T*** representa el índice del umbral de enmascaramiento y *t* las dos últimas cifras de la magnitud de dicho parámetro. Entonces si se tiene, por ejemplo, la prueba de tipo *S32x16_S2_T90*, significa que se usará una ventana inicial con dimensiones de 32 por 32 pixeles y una ventana final de 16 pixeles por 16 pixeles (ancho y altura), ambas ventanas cuadradas tendrán un paso de separación de 2 pixeles y un índice de umbral de enmascaramiento de 0.90. Según Leprince et al (2007), se recomienda usar ventanas de correlación final con magnitudes menores o iguales a las de ventanas de correlación inicial y el tamaño del paso debe ser menor o igual a la ventana final. Mientras que el índice de umbral de enmascaramiento siempre debe tender hacia el valor de 1.

SATÉLITE	PRUEBAS		IMÁGENES		DIFERENCIA TEMPORAL	
	NOMBRE	TIPO	PRINCIPAL	SECUNDARIA	TOTAL	DÍAS
SPOT 6	NQ1	S8X8_s2_T90	14/07/2017	3/07/2019	1 año 11 meses 17 días	719
	NQ2	S32X32_s16_T90				
	NQ3	S64X64_s32_T90				
SENTINEL 2	NP1	S8X8_s2_T90	8/11/2017	18/11/2017		10
	NP2		18/11/2017	7/04/2018	4 meses 18 días	140
	NP3		18/11/2017	12/04/2018	4 meses 23 días	145
	NP4		18/11/2017	21/06/2018	7 meses 3 días	215
	NP5		18/11/2017	23/11/2018	1 año 5 días	370
	NP6		7/04/2018	12/04/2018		5
	NP7		7/04/2018	21/06/2018	2 meses 14 días	75
	NP8		12/04/2018	21/06/2018	2 meses 9 días	70
	NP9		7/04/2018	23/11/2018	7 meses 16 días	230
	NP10		21/06/2018	23/11/2018	5 meses 2 días	155
	NP11		21/06/2018	1/07/2018		10
	NP12		18/11/2017	12/01/2019	1 año 1 mes 23 días	420
	NP13		18/11/2017	31/07/2019	1 año 8 meses 13 días	620
	NP14		18/11/2017	13/12/2019	2 años 24 días	755
	NP15		12/01/2019	31/07/2019	6 meses 19 días	200
	NP16		12/01/2019	13/12/2019	11 meses 1 día	335
	NP17		31/07/2019	13/12/2019	4 meses 10 días	135
	NP18		1/07/2018	31/07/2019	1 año 30 días	395
	NP19		23/11/2018	12/01/2019	1 mes 18 días	50
	NP20		8/11/2017	13/12/2019	2 años 1 mes 5 días	765

Tabla 9. Datos de entrada para las correlaciones de imágenes satelitales.

La distribución temporal de todas las pruebas desarrolladas en el presente estudio, se encuentra representado en el esquema de la Figura 27. La extensión temporal total del estudio inicia en el 14 de julio del 2017 y finaliza el 13 de diciembre del 2019, con un total de 765 días para la prueba que abarca mayor tiempo y con 5 días para la de menor extensión temporal. Debido a que el software COSI-Corr impide el uso simultaneo de imágenes de diferentes plataformas para las pruebas de correlación, entonces se optó por implementar las combinaciones presentes en la Figura 26 para cada prueba (NPn y NQn; n=1, 2, 3 …. 20), es por esto también que hay "agujeros" en la línea temporal del esquema de dicha figura, como por ejemplo realizar una prueba no valida de correlación con la imagen SPOT 6 de fecha del 3 de julio del 2019 (principal) y una imagen Sentinel 2 del 13 de diciembre del 2019 (secundaria).

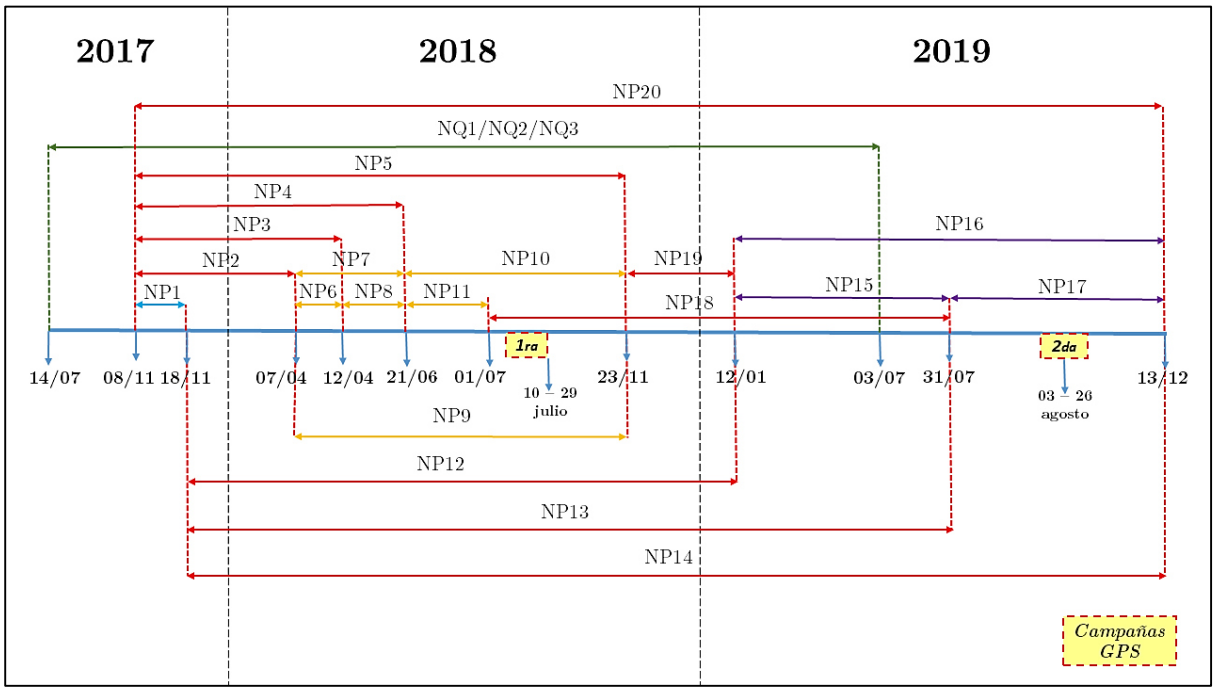


Figura 27. Esquema de la distribución temporal de las pruebas. Las líneas negras de trazo representan las separaciones anuales. La flecha de color azul abarca toda la extensión temporal de estudio con sus respectivas fechas para cada imagen usada, solo las flechas en rojo representan las pruebas que abarcan distintos años (2017, 2018 y 2019), mientras que la flechas celestes, naranjas y moradas representan las pruebas realizadas en años únicos, sin abarcar otros años y la flecha verde muestra la extensión temporal de las pruebas solo con imágenes SPOT 6, a diferencia del resto que fueron realizadas con imágenes Sentinel 2. Los cuadros amarillos muestran las ubicaciones temporales de las campañas GPS.

4.3 Salidas iniciales

La correlación de subpíxeles de las imágenes ópticas SPOT 6 y Sentinel 2 se logró mediante la aplicación de la metodología descrita en el capítulo 3, utilizando imágenes de diferentes fechas y con el empleo de distintos parámetros (Tabla 9). Usando las imágenes correlacionadas se derivaron diferentes productos en forma de mapas y gráficos para realizar comparaciones, interpretaciones y validaciones. Uno de los primeros resultados del proceso de correlación, son las imágenes compuestas de tres bandas con patrones de moteado (Figura 28), de las cuales dos de ellas contienen valores de desplazamientos horizontales y la tercera los valores de la relación señal/ruido.

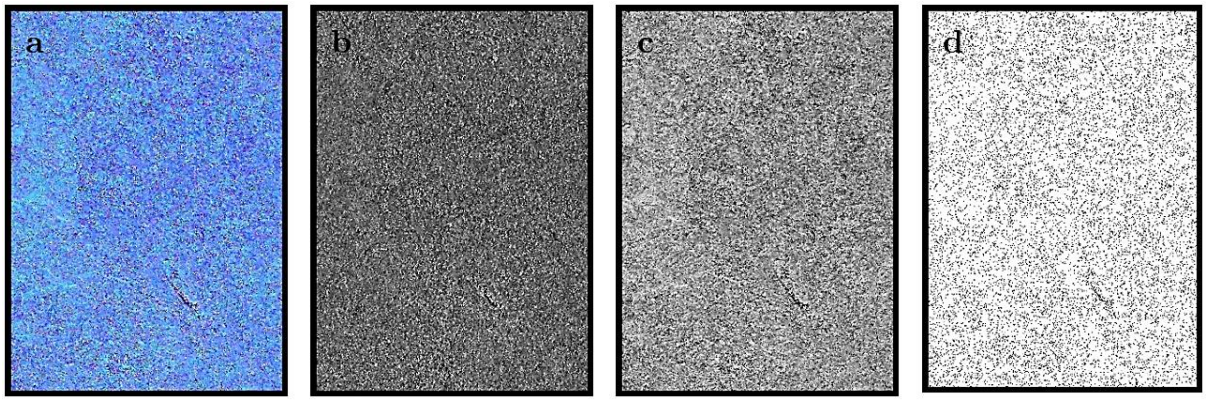


Figura 28. Resultados del proceso de correlación de la Prueba NQ1 con patrones de moteado disperso en la totalidad de las imágenes. a) Composición RGB de las tres bandas. b) La banda 1 contiene los desplazamientos horizontales este–oeste (E-W), mientras que c) la banda 2, los desplazamientos norte-sur (N-S) de las deformaciones superficiales terrestres. d) Representación gráfica de la tercera banda, en donde se encuentran los datos de la relación señal/ruido (SNR).

La imagen final de correlación (Figura 28a) contiene los valores de los desplazamientos horizontales. Al aplicar la interpolación a las mallas de puntos (apéndice F) obtenidas por las correlaciones subpíxel, se determina e identifica la ubicación y la forma de las zonas donde se habría producido deformación significativa, información que posteriormente es utilizada para la clasificación del tipo de movimiento en masa y su posterior correlación con información geodésica y geomorfológica. Los resultados obtenidos muestran áreas de decorrelación (es decir con presencia de falsos desplazamientos), las cuales se ubican en el extremo noreste y noroeste de las imágenes utilizadas. Estas áreas fueron producto de la presencia de grandes sombras generadas por nubes o distorsiones de las propias imágenes y en general son regiones que presentan grandes estimaciones de deformación (>1.50 m), siendo incoherentes con los resultados esperados. Por lo tanto, estas áreas no fueron consideradas para los análisis

posteriores, pero si fueron señaladas y definidas para una mejor visualización de las delimitaciones territoriales. Sin embargo, la ciudad de Huancabamba (zona principal de estudio) está lejos (~6 km) del área de influencia de estas zonas.

4.4 Prueba NQ1

4.4.1 Desplazamientos horizontales E-W

Antes de empezar con el análisis de los desplazamientos, tener en cuenta que en el apéndice E se presente un mapa con las delimitaciones urbanas (pasajes, calles, jirones, avenidas y barrios) de la ciudad de Huancabamba, de esta manera se complementará la información descrita en secciones posteriores y así tener una mejor comprensión de la distribución espacial de las zonas de mayor deformación. Con el mismo propósito informativo, en los apéndices B y C, se puede tener más información sobre las pendientes y sus respectivas orientaciones presentes en el área de estudio.

En la figura 29, se muestra el mapa de los desplazamientos horizontales E-W, en donde las magnitudes positivas indican orientación hacia el este y las negativas hacia oeste. Esta vista general de las zonas de mayor deformación superficial (en tonos rojizos) demuestra la notable inestabilidad generada por desplazamientos presentes en la ciudad de Huancabamba, mientras que las zonas en tonos azules, representan las bajas magnitudes de desplazamientos en dirección Oeste, indicando así que hay una mayor tendencia, por parte de los movimientos de masa, a desplazarse hacia el este. En total se identificaron dentro de la ciudad 7 zonas de mayor deformación superficial registradas con el término ZEn (n=1,2...7) y dos zonas (ZW1 y ZW2) en donde hay menores magnitudes de desplazamientos y son posibles zonas de estabilidad. Estas 7 zonas, delimitadas por líneas negras de trazo (ver figura 29) tienen una fuerte tendencia de dirección de propagación hacia el este y en general presentan magnitudes que oscilan desde 0.11 m hasta 0.19 m.

La primera zona identificada como ZE1, es la más pequeña de todas y se encuentra muy al norte del centro de la ciudad, cerca al barrio La Villa, entre el jirón Ayabaca y la prolongación de esta misma, en dirección al noroeste (forman una “V”). Esta pequeña zona presenta 0.01 Km^2 de área y un perímetro de 0.40 Km. Ahí se estimaron desplazamientos con magnitudes de 0.12 m hasta ~ 0.14 m, con dirección este y noreste, hacia el inicio de la calle Huaringas.

La segunda zona (ZE2) ocupa una extensión de 0.10 Km^2 y está delimitada por un perímetro de 1.68 Km. Abarca la parte sur del barrio La villa y gran parte del barrio Alto de la Paloma, extendiéndose a lo largo de la parte media del jirón Ayabaca, la calle y avenida Centenario, hasta aproximadamente la intersección de estas tres direcciones, a ~ 100 m de la entrada de la Terminal Terrestre de la ciudad. Las magnitudes de los desplazamientos encontrados en esta zona están entre ~ 0.12 m a 0.18 m con dirección este, hacia la prolongación sur de la calle Huaringas.

Por otro lado, se determinó que la zona ZE3, ubicada al extremo suroeste del barrio Chalaco y muy cerca de la terminal terrestre, presenta desplazamientos de 0.10 m hasta 0.14 m. Cuenta con un área de aproximadamente 0.03 Km^2 y un perímetro de 0.68 Km, encontrándose muy cerca a la orilla oriental del rio Huancabamba.

La cuarta zona (ZE4) se encuentra al norte del centro de la ciudad, abarcando la parte norte del barrio La Villa, grandes áreas de los barrios La Laguna y el Altillo. Inicia desde el jirón Mirador, prolongándose en dirección norte del jirón Pueblo Nuevo y comprendiendo la calle Yapato. En esta región se encuentran desplazamiento desde 0.11 m hasta ~ 0.15 m, en donde la concentración de mayores magnitudes está a lo largo de la calle Yapato con dirección hacia el jirón Pueblo Nuevo. Extendiéndose con 0.05 Km^2 y delimitada por 0.97 Km de perímetro.

La zona ZE5 es la más grande de todas estas, ubicándose al noreste de la ciudad y su extensión superficial abarca 0.18 Km^2. Se extiende desde el barrio La Villa, en dirección hacia el sureste, abarcando gran parte del barrio Chalaco y la parte noroeste del barrio Jibaja Che. Esta zona abarca un 12% del área total delimitada por el polígono con línea de trazo rojo (ver figura 29). Calles al sur del centro de la ciudad, como El Porvenir, 2 de mayo, Morropón y entre otras, están dentro del área de inestabilidad de esta gran deformación superficial, en donde las magnitudes de desplazamientos encontradas van desde 0.11 m hasta ~ 0.17 m.

La zona ZE6 se encuentra muy cerca al rio Huancabamba, colindando con la calle Héroes del Senepa, en la parte oeste del barrio Chalaco. Consta de un área de 0.04 Km^2 y está delimitada por 0.85 Km de perímetro. El rango de desplazamiento hallado en esta zona es de 0.11 m hasta ~ 0.15 m.

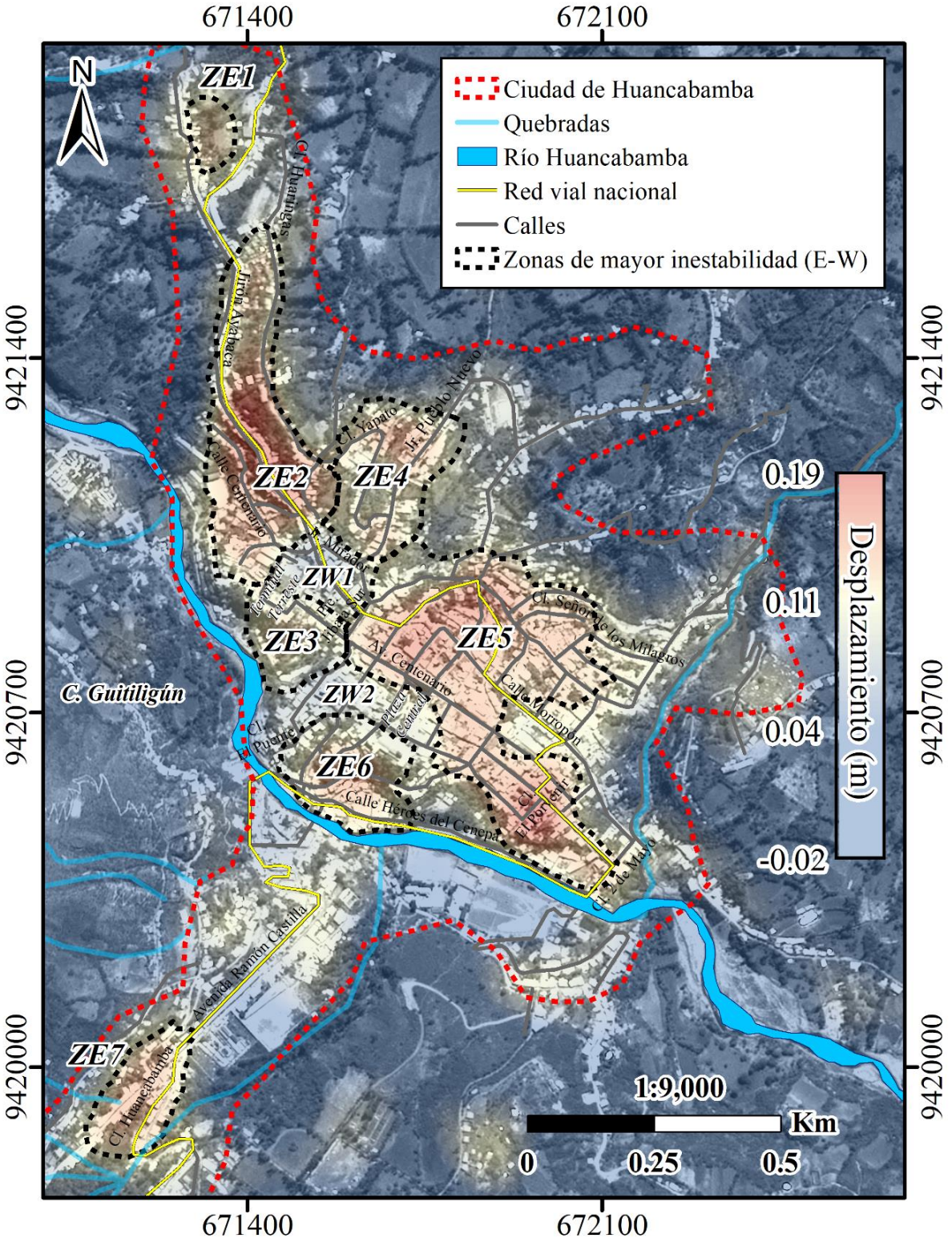


Figura 29. Mapa de desplazamientos horizontales este-oeste, en la ciudad de Huancabamba.

Uno de los lugares más alejados del centro de la ciudad y que presenta desplazamientos de 0.13 m hasta ~ 0.15 m, es la última zona, llamada ZE7 y está ubicada cerca del pie del cerro Guitiligún, en el lado suroeste de la ciudad, en el barrio Ramón Castilla. A pesar que no se encuentra cerca al rio Huancabamba, como para suponer que existe una correlación del filtrado de agua y los desplazamientos encontrados en esta zona, presenta magnitudes de desplazamientos de muy elevadas, con posible dirección de movimiento que va desde la avenida Ramón Castillas hasta la calle Huancabamba, abarcando un área de 0.03 Km^2 y perímetro de 0.76 Km.

Por otra parte, también se identificaron dos zonas de aparente estabilidad (ZW1 y ZW2), en donde las magnitudes de las deformaciones son mucho más bajas (< 0.04 m) en comparación a las magnitudes descritas anteriormente. La zona ZW1 se encuentra entre ZE1 y ZE4, y se extiende desde las afueras de la terminal terrestre hasta cerca del pasaje Jibaja Sur. Mientras que la zona ZW2, inicia en la calle El puente hasta parte de la plaza central de la ciudad.

Finalmente, las áreas de mayor de deformación identificadas en esta prueba (ver tabla 10), representan el 28% del área total de la ciudad (Polígono con línea de trazo rojo). Tener en cuenta que estos resultados fueron extraídos del procesamiento de imágenes satelitales SPOT 6, obtenidas de las fechas: 14 de julio del 2017 (Principal) y 3 de julio de 2019 (Secundaria), con una diferencia de 719 días. Debido a que la ventana de tiempo es prolongada, los cambios morfológicos identificados con esta prueba, pueden haber ocurrido progresivamente durante este periodo o bien haber sido acelerados por algún agente externo. Al final del presente capítulo se realiza la correlación de magnitudes de desplazamientos con información sísmica y meteorológica.

En la figura 30, se muestra el mapa de toda la zona de estudio. En ella se observa las zonas con desplazamientos horizontales con orientación hacia el oeste (regiones de azul) y este (regiones rojas). Las regiones de color amarillo presentan desplazamientos con magnitudes aproximadamente desde 0.04 m hasta 0.10 m, hacia el este. Mientras que en la tabla 10 se presentan todas las zonas de mayor deformación analizadas y sus principales características.

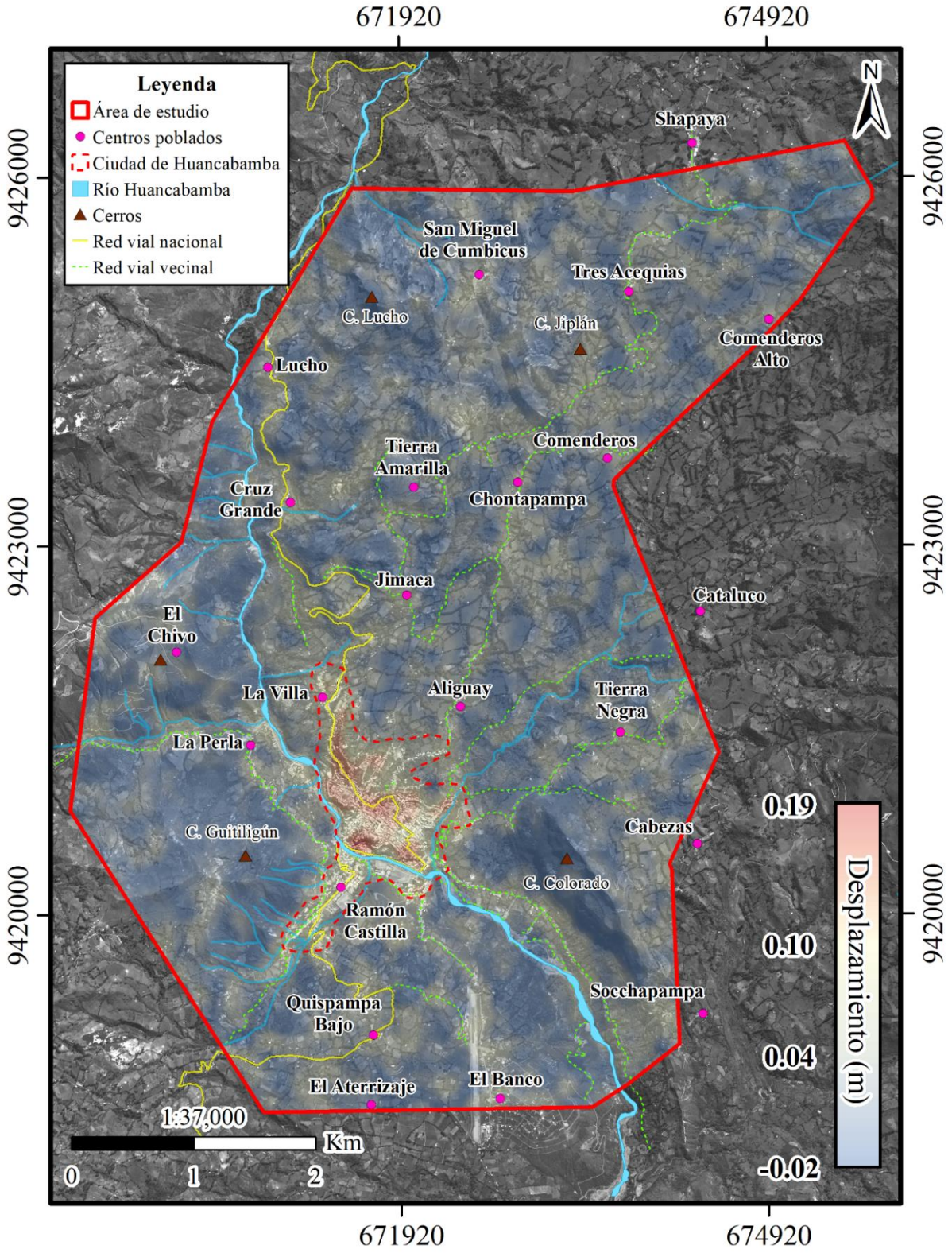


Figura 30. Mapa de desplazamientos horizontales Este-Oeste en toda el área de estudio.

DESPLAZAMIENTOS HORIZONTALES E-W			
Zona	**Área (km²)**	**Perímetro (km)**	**Rango de desplazamiento (m)**
ZE1	0.01	0.40	0.12 - 0.14
ZE2	0.10	1.68	0.12 - 0.18
ZE3	0.03	0.68	0.10 - 0.14
ZE4	0.05	0.97	0.11 - 0.15
ZE5	0.18	2.48	0.11 - 0.17
ZE6	0.04	0.85	0.11 - 0.15
ZE7	0.03	0.76	0.13 - 0.15

Tabla 10. Resumen de las zonas de mayor deformación superficial terrestre con sus respectivos rangos de desplazamientos horizontales este-oeste, determinados en la prueba NQ1.

4.4.2 Desplazamientos horizontales N-S

En la figura 31 se muestra el mapa de los desplazamientos horizontales N-S, en donde las magnitudes positivas indican orientación hacia norte y las negativas hacia sur. Para el caso de los desplazamientos horizontales N-S, se identificaron 6 zonas de mayor deformación superficial en tonos rojizos, dentro del perímetro de la ciudad (ver figura 31). Estas zonas (ZSn, n = 1, 2, 3, 4, 5 y 6) tienen una fuerte tendencia de dirección de propagación hacia el sur y presentan magnitudes desde 0.08 m hasta 0.19 m.

La zona ZS1 está muy cerca a la ubicación de la zona ZE1, muy al norte del centro de la ciudad de Huancabamba y cerca al barrio La Villa. A diferencia de ZE1, la zona ZS1, se encuentra al este de la formación "V" (descrita anteriormente), entre el jirón Ayabaca y calle las Huaringas. Presenta un área de 0.03 Km^2 y 0.73 Km de perímetro. En dicha región se encontraron desplazamientos con magnitudes de 0.08 m hasta ~0.13 m.

Siguiendo en dirección hacia el sur de ZS1, se observa la zona ZS2, la cual ocupa una extensión de 0.06 Km^2 y delimitada por un perímetro de 1.20 Km. Se extiende a lo largo de la parte sur del jirón Ayabaca, antes de su intersección con el jirón Mirador (Entre los barrios Alto de La Paloma y La Villa), las afueras del terminal terrestre y una parte colinda a ~ 180 m de la orilla del rio Huancabamba. Las magnitudes de los desplazamientos encontrados en dicha región están entre ~ 0.09 m a 0.18 m.

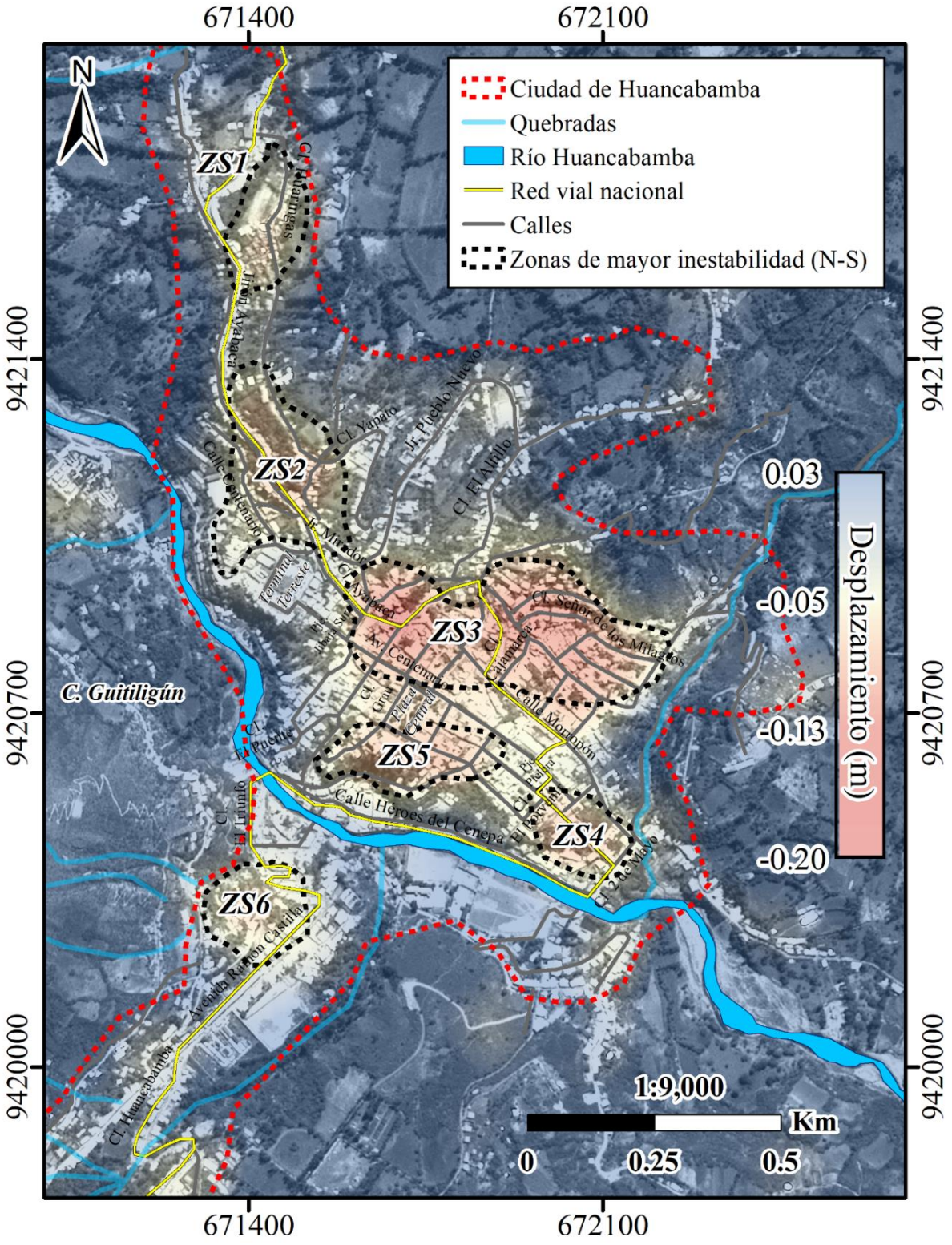


Figura 31. Mapa de desplazamientos horizontales norte-sur en la ciudad de Huancabamba

Como se observa en la figura 31, la zona ZS3 (la más grande de todas), tiene una extensión de 0.12 Km^2 y un perímetro de 1.6 Km y es la zona ZS3, abarca solo el 8 % del área total delimitada por el polígono rojo (ver figura 37). Se extiende por los barrios La Villa, La Laguna,

Jibaja Che y una parte considerable del barrio Chalaco. Calles como Ayabaca, El altillo, Grau y Cajamarca, son algunas de las afectadas por la inestabilidad de esta gran deformación superficial, en donde las magnitudes de desplazamientos estimados oscilan entre 0.10 m hasta ~ 0.17 m.

En contraste a la región ZS3, la zona ZS4 es la más pequeña de todas y se encuentra al este del barrio Jibaja Che, entre la calle El Porvenir y la calle 2 de mayo. En esta zona se estimaron desplazamientos desde 0.09 m hasta ~ 0.11 m, en donde la concentración de mayores magnitudes se ubica en la intersección de la calle 2 de mayo y el pasaje Pielera. Consta de una extensión superficial de 0.02 Km^2 y un perímetro de 0.60 Km.

La zona ZS5, ubicada al sur de la plaza central de la ciudad, presenta desplazamientos de 0.11 m hasta ~ 0.15 m. Cuenta con un área de aproximadamente 0.03 Km^2 y perímetro de 0.87 Km. Mientras que la última región identificada como ZS6, compromete la seguridad física de la ciudad, desde la calle El Triunfo y parte de la avenida Ramón Castilla, con desplazamientos de 0.09 m hasta ~ 0.11 m y abarca un área de 0.03 Km^2 y 0.65 Km de perímetro.

Recapitulando lo detallado en los análisis anteriores, todas estas extensiones territoriales (ver tabla 11) representan el 19% del área total de la ciudad. Esto quiere decir que la seguridad física de 0.29 Km^2 del área propuesto (Polígono con línea de trazo rojo), están comprometidos con desplazamientos horizontales en dirección norte o sur (N-S). Nuevamente se observa un notable comportamiento de baja magnitud de desplazamiento en la plaza central de la ciudad y alrededores, en este caso fueron determinadas magnitudes menores a 0.09 m.

DESPLAZAMIENTOS HORIZONTALES N-S			
Zonas	**Área (km^2)**	**Perímetro (km)**	**Rango de desplazamiento (m)**
ZS1	0.03	0.73	0.08 - 0.13
ZS2	0.06	1.20	0.09- 0.18
ZS3	0.12	1.66	0.10 - 0.17
ZS4	0.02	0.60	0.09 - 0.19
ZS5	0.03	0.87	0.11 - 0.15
ZS6	0.03	0.65	0.09 - 0.11

Tabla 11. Resumen de las zonas de mayor deformación superficial terrestre con sus respectivos rangos de desplazamientos horizontales norte-sur, determinados en la prueba NQ1.

En la figura 32, se muestra el mapa con vista general de toda la zona de estudio. En ella se observa las zonas con desplazamientos horizontales con orientación hacia el norte (regiones de azul) y sur (regiones rojas). Las regiones de color amarillo presentan desplazamientos con magnitudes aproximadamente desde 0.04 m hasta 0.11 m hacia el sur.

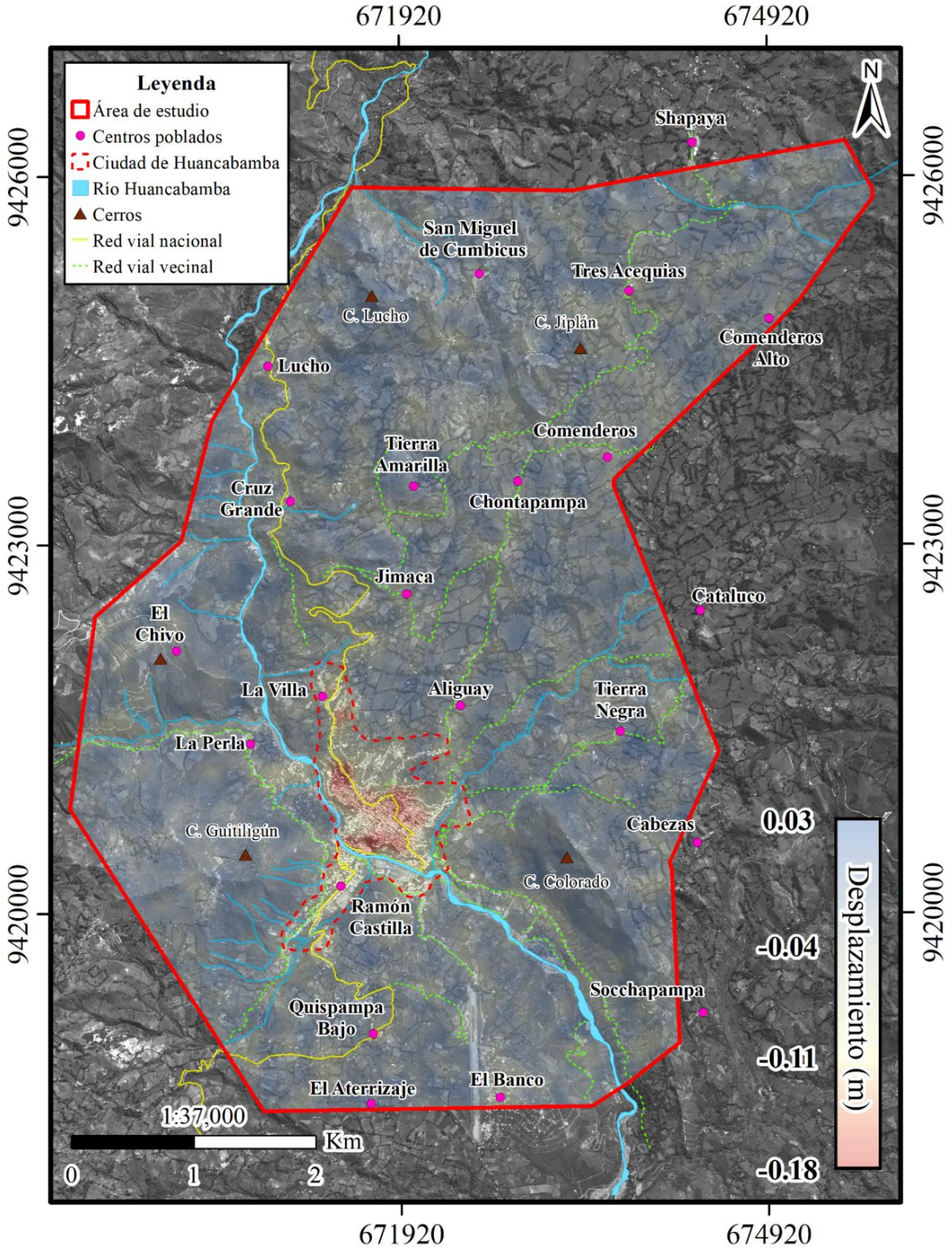


Figura 32. Mapa de desplazamientos horizontales Norte-Sur en toda el área de estudio.

4.4.3 Desplazamientos Resultantes

Luego de analizar a detalle los resultados de los desplazamientos en las componentes E-W y N-S, se procedió a analizar los desplazamientos resultantes o acumulativos, determinados a partir de la correlación de imágenes SPOT 6 con una diferencia temporal de 719 días, correspondientes a la prueba NQ1. Esto quiere decir, que si en un punto específico se detecta un cambio de posición con una magnitud igual o superior a 0.10 m, entonces significa que, en los 719 días transcurridos, desde el 14 de julio del 2017 hasta el 3 de julio del 2019, se ha producido un desplazamiento o movimiento en masa en una determinada dirección.

En la figura 33 se muestra el mapa de los desplazamientos resultantes obtenidos de la prueba de correlación subpíxel. Se identificó 3 zonas con altas tazas de deformación superficial (ZR1, ZR2 y ZR3), ubicadas en la zona urbana y alrededores de la ciudad de Huancabamba. En general, estas zonas presentan magnitudes que van desde la posible estabilidad (< 0.001 m) hasta grandes desplazamientos acumulados de magnitudes mayores a 0.27 m.

La primera zona de mayor deformación ZR1 (ver Figura 33), se encuentra al noroeste del centro de la ciudad, iniciando aproximadamente a la altura de la calle Huaringas y extendiéndose a lo largo del jirón Ayabaca, calle Centenario, jirón Pueblo Nuevo y abarcando la parte sur del Terminal Terrestre, hasta llegar al pasaje Jibaja Sur. Esta zona presenta un área total de 0.27 Km^2 y con un perímetro de 3.77 Km. Lleva siendo afectada por desplazamientos con magnitudes de 0.14 m hasta 0.24 m, donde el foco de mayor deformación se encuentra en la prolongación sur del jirón Ayabaca (paralelamente a la Cl. Centenario). La ZR1 está asentada sobre una superficie terrestre con pendientes entre 4° y 32° y con orientaciones principalmente al este (centro de ZR1) y sur (zonas norte de ZR1).

Por otro lado, la región ZR2 es la que cubre mayor extensión territorial que el resto de zonas, comprendiendo un área de 0.29 Km^2 y perímetro de 2.94 Km. Esta zona concentra gran inestabilidad en toda su extensión y en ella se observan desplazamientos de magnitudes de 0.17 m hasta 0.25 m. La ZR2 abarca más del 90 % del territorio de los barrios de Jibaja Ch, La Laguna y Chalaco, más del 50% del territorio del barrio Alto de la Paloma y unas pequeñas zonas al sur de los barrios El Altillo y La Villa. Las zonas inestables en ZR3 compromete calles como Ayabaca, Morropón, Sr. De los Milagros, El Porvenir, entre otras, hasta llegar al límite

Este de la ciudad, aproximadamente por la calle 2 de mayo. La ZR2 presenta pendientes entre 3° y 35° aproximadamente y en promedio están orientadas hacia el Este y otras hacia el Sureste.

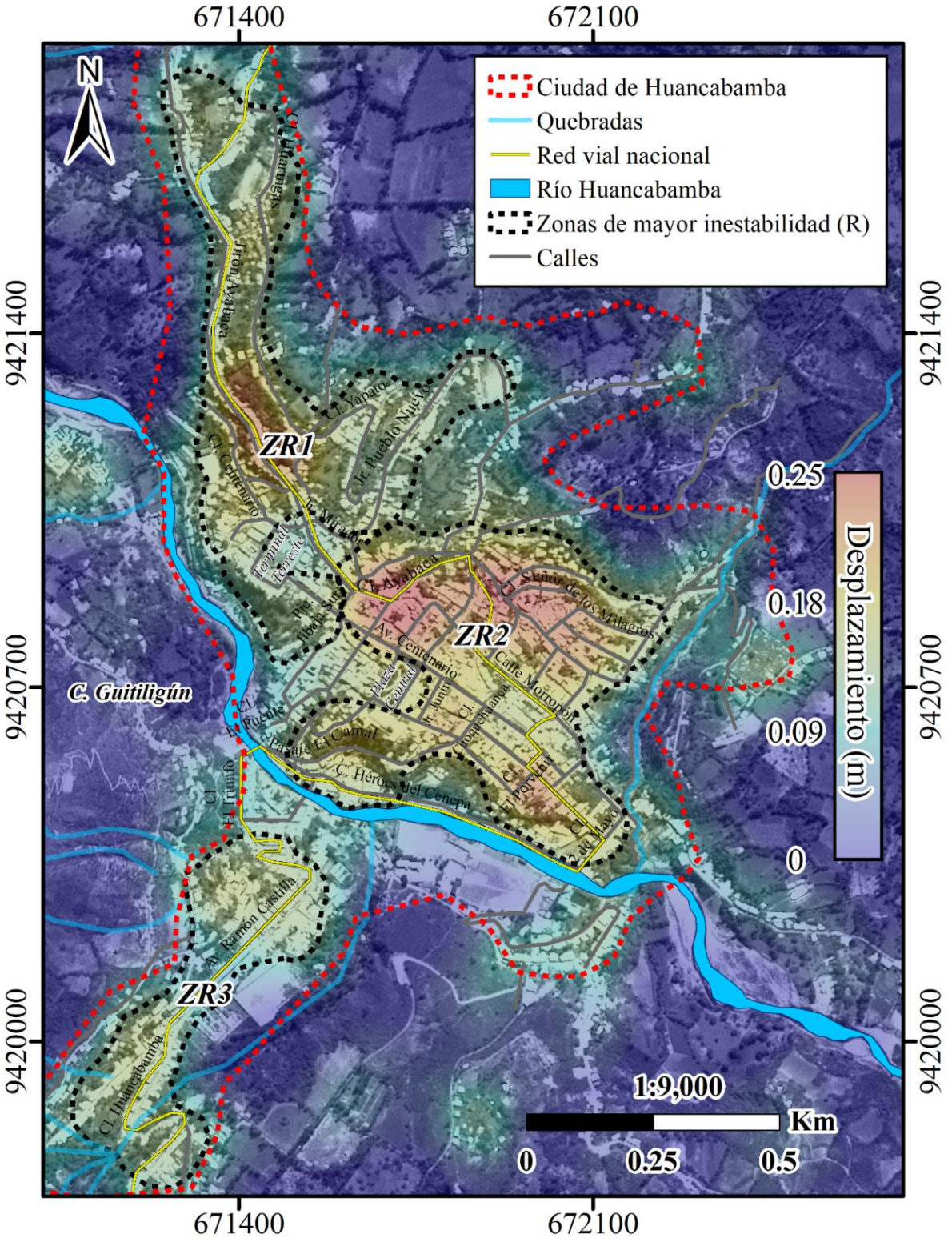


Figura 33. Mapa de desplazamientos resultante obtenidos mediante el procesamiento de imágenes SPOT 6 para el periodo 2017-2019, en la ciudad de la ciudad de Huancabamba y alrededores.

Por otra parte, la zona ZR3 es la más pequeña de todas, está ubicada en el barrio Ramón Castilla y ocupa una superficie de 0.13 Km^2. Está formada por dos focos donde se concentran las tazas de mayor deformación. El primero de ellos está al lado izquierdo de la avenida Ramón Castilla, mientras que el segundo se extiende a lo largo de la calle Huancabamba, al suroeste del barrio mencionado. Las magnitudes de los desplazamientos estimados en esta zona oscilan desde ~ 0.10 m a 0.18 m con dirección mayoritariamente al este y sureste hacia el rio Huancabamba.

Recapitulando lo detallado en esta sección, las tres zonas determinadas (ver tabla 12) representan el 44% del área total de la ciudad, es decir que la seguridad física de 0.69 Km^2 del área propuesta perteneciente al polígono con perímetro de color rojo, están comprometidos con desplazamientos de magnitudes oscilantes entre 0.10 m a 0.25 m. Con todos estos resultados, se confirma lo reportado por otros autores, quienes indican que la ciudad de Huancabamba presenta muchas áreas de alta inestabilidad (A. Córdova, 2018; N. Córdova, 2019; Villegas-Lanza et al., 2019).

DESPLAZAMIENTOS RESULTANTES			
Zonas	**Área (km^2)**	**Perímetro (km)**	**Rango de desplazamiento (m)**
ZR1	0.27	3.77	0.14 - 0.24
ZR2	0.29	2.94	0.17 - 0.25
ZR3	0.13	2.02	0.10 - 0.18

Tabla 12. Resumen de las zonas de mayor deformación superficial terrestre con sus respectivos rangos de desplazamientos resultantes, determinados en la prueba NQ1.

En la figura 34, se muestra el mapa de los desplazamientos resultantes para toda la extensión del área de estudio. Las zonas de color morado son aquellas consideradas estables, ya que presentan desplazamientos resultante menores a 0.09 m, mientras que las zonas en tonos rojizos son de mayor inestabilidad (> 0.20 m), producto de los movimientos en masa presentes en todo el tiempo de estudio para la prueba NQ1.

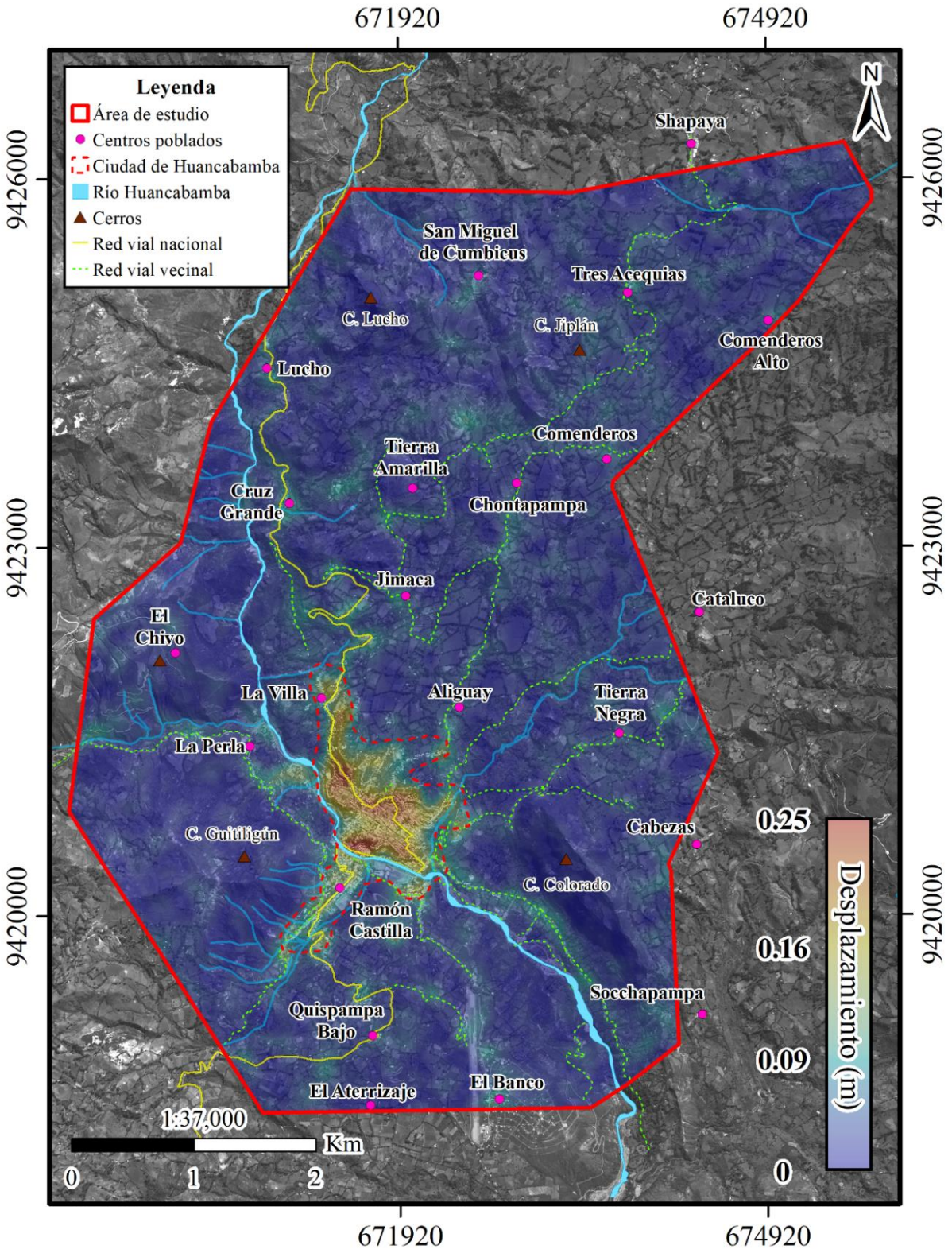


Figura 34. Mapa de desplazamientos resultantes.

Algo peculiar y notable que se puede rescatar del análisis visual de los resultados anteriores, es que no se obtuvieron zonas muy marcadas fuera de la ciudad (en toda la extensión del área de estudio), como se observa en las figuras 30, 32 y 34, en comparación con los resultados de Sentinel 2, como se observará más adelante, son más marcados y ocupan más extensión

territorial. Nuevamente se recalca que esto se debe al proceso de ortorrectificación de las imágenes SPOT 6, ya que como se mencionó en la sección 3.2.3.3 y en base a lo detallado en la sección 4.1, estas imágenes fueron procesadas con DSMs, por lo que el motor de correlación priorizará la búsqueda de las zonas de mayor deformación que estén fuera de áreas abundante vegetación, las cuales están más presentes en la ciudad misma debido a las características del mismo DSM y a la baja resolución espacial de las imágenes pancromáticas SPOT 6 (1.5 m) en comparación de las imágenes Sentinel 2 (10 m), resultando una correlación más precisa debido también a los pixeles de menor tamaño.

4.5 Prueba NP12

Hasta ahora se ha analizado el comportamiento dinámico de las remociones de masa, centrándose en zonas dentro de la ciudad de Huancabamba, pero no se ha enfatizado en regiones de mayores extensiones territoriales y que estén posicionadas fuera de la ciudad. En parte, esto se debió a que en la prueba NQ1 se utilizó imágenes SPOT 6 y solo permitía un análisis a zonas con cambios en la superficie terrestre que estén cerca a centros poblados o pequeñas zonas urbanas. Es entonces que la prueba NP12 es relevante para solucionar este inconveniente, ya que al haber sido ortorrectificada con un Modelo Digital de Terreno (DTM), por lo que el proceso de correlación con estas imágenes ofrece resultados con la capacidad de análisis más general, es decir, centrándose en la cobertura de extensas áreas y ya no en zonas solo cercanas a centros urbanos.

4.5.1 Falsos desplazamientos

Es necesario realizar un preanálisis de los resultados de la prueba NP12 debido a que las imágenes (secundaria y principal) usadas en el proceso de la correlación subpíxel, presentaban algunas regiones cubiertas con nubes y grandes sombras (ver sección 2.2.6). Si no se discrimina este tipo de dato, podría llevar a determinar resultados incoherentes con falsas magnitudes de desplazamientos horizontales. En la figura 35 se observa secciones de la imagen principal (18 de noviembre del 2017) y secundaria (12 de enero 2019) utilizadas para el desarrollo de la prueba NP12. La imagen del 2017 tiene cero porcentajes de nubosidad dentro del área de estudio, mientras que la imagen del 2018 presenta grandes sombras que fueron generadas por nubes, en la parte noroeste y noreste extremo del área de estudio. Estas zonas presentan grandes magnitudes de desplazamientos, mayores a 0.80 m, para el caso de desplazamientos horizontales E-W, mientras que para desplazamientos N-S, se observaron magnitudes de hasta 0.25 m con dirección preferencial hacia el norte. Con todo lo descrito, también se complementa

la incoherencia de dirección de desplazamiento de estas dos zonas respecto a las orientaciones de pendientes (ver apéndice C). Las zonas AE1 y AE2 (ver figura 36) presentan desplazamientos en dirección este, mientras que el relieve en esta zona, presenta pendientes orientadas hacia el norte (0° a 22°), noroeste (248° a 282°) y en pequeñas zonas hacia el noreste (22° a 67°). Esto contradice la dirección de desplazamiento natural de las remociones de masa, que en general para esta zona, estarían en dirección hacia el rio Huancabamba. De la misma forma, para el caso de la banda con los desplazamientos horizontales N-S, se encontró un efecto contradictorio entre direcciones de pendientes presentes en las zonas AN1 y AN2 (ver figura 37) y los resultados de dicha banda. Esta correlación entre pendientes, orientación de pendientes y dirección de desplazamientos, se analiza más a profundidad en el capítulo 5.

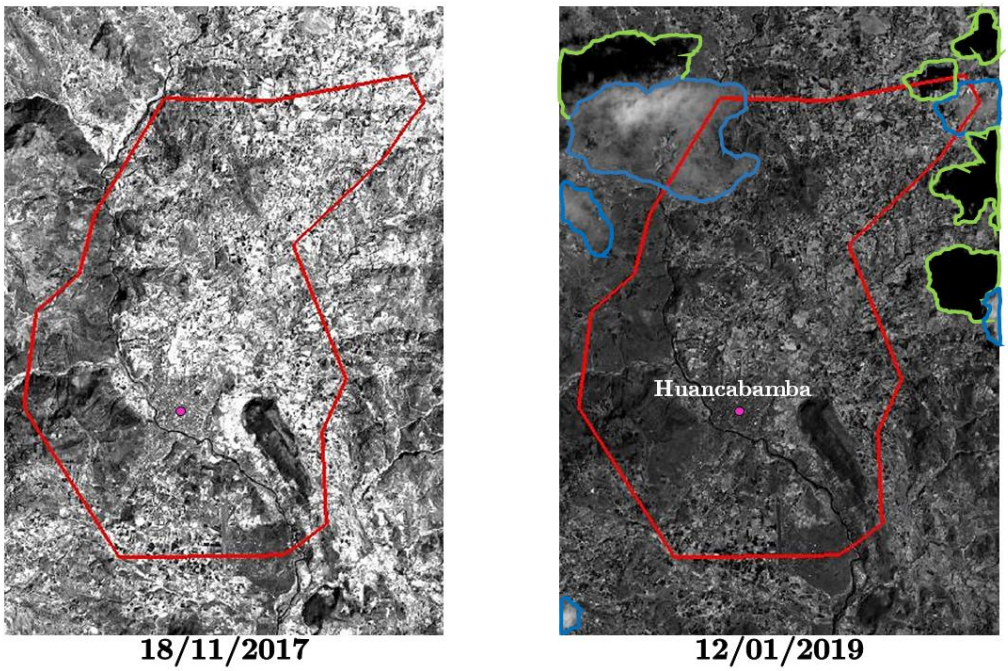


Figura 35. Secciones de las imágenes Sentinel 2 usadas en la prueba de correlación subpíxel NP12. Los polígonos rojo, verde y azul representan respectivamente el área total de estudio, grandes sombras y nubes encontradas al norte y sur de la ciudad de Huancabamba. La diferencia de contraste en las imágenes se debe a que ambas fueron tomadas en diferentes horas del día.

En conclusión, para el análisis posterior a esta sección se descarta los resultados de estas zonas (AE1, AE2, AN1 y AN2) para mapas de desplazamientos horizontales E-W, N-S, y como los desplazamientos resultantes derivan de la aplicación de la raíz cuadrada de la suma de las magnitudes de ambos resultados anteriores (ecuación 13), entonces también se aplica la exclusión analítica de las zonas AR1 y AR2 presentes en el mapa de desplazamientos resultantes (figura 38). En el caso de la prueba NQ1, no hubo la necesidad de hacer este tipo de análisis ya que las secciones de las imágenes SPOT 6 principal (14 de julio del 2017) y

secundaria (3 de julio del 2019) que se usaron para dicha prueba, no cuentan con áreas cubiertas por nubes o cualquier sombra generada por efectos atmosféricos.

4.5.2 Desplazamientos horizontales E-W

El análisis general de los desplazamientos horizontales este-oeste (E-W), demuestra la presencia de 4 áreas extensas (ver Tabla 13), donde se desencadenaron grandes desplazamientos respecto al tiempo de estudio de esta prueba (420 días). En la Figura 36 se muestra el mapa con los resultados interpolados de la prueba NP12, donde la zona AE3 cubre una extensa superficie territorial (3.46 km^2) y está ubicada al norte de la ciudad de Huancabamba, abarcando los centros poblados de Chontapampa, la parte este de Tierra Amarilla, Jimaca y la parte norte de Aliguay. Las magnitudes de los desplazamientos medidos en dicha zona son desde 0.38 m hasta ~ 0.73 m y la parte sur de esta gran zona se dirige hacia la quebrada Ungulo y otra parte hacia la quebrada Cojunda. La segunda región con más extensión territorial es AE4, con un área aproximada de 2.63 Km^2, ocupa gran parte sureste del cerro El chivo, el centro poblado La Perla y el cerro Guitiligún cerca al barrio Ramón Castilla. En esta zona se estimaron magnitudes de desplazamiento entre 0.30 m hasta ~ 0.62 m, en donde la pequeña región entre el centro poblado La Perla y la parte norte del cerro Guitiligún se encuentran las mayores deformaciones superficiales. Por otro lado, se determinó que la zona AE5, ubicada al margen derecho del cerro Colorado y a medio kilómetro al suroeste del centro poblado Cabezas, presenta desplazamientos de 0.25 m hasta ~ 0.46 m. Abarca un área ~ 0.28 Km^2 y un perímetro de 2.32 Km. La zona AE6, con desplazamientos de 0.42 m hasta ~ 0.62 m, ocupando gran parte del centro poblado El Banco, al este del aeródromo de la ciudad de Huancabamba y compromete una superficie de 0.20 Km^2.

DESPLAZAMIENTOS E-W			
Zonas	**Área (km^2)**	**Perímetro (km)**	**Rango de desplazamiento (m)**
AE3	3.46	11.7	0.38 – 0.73
AE4	2.63	8.02	0.30 – 0.62
AE5	0.28	2.32	0.25 – 0.46
AE6	0.20	2.06	0.42 – 0.62

Tabla 13. Resumen de las zonas de mayor deformación superficial terrestre con sus respectivos rangos de desplazamientos horizontales E-W, determinados en la prueba NP12.

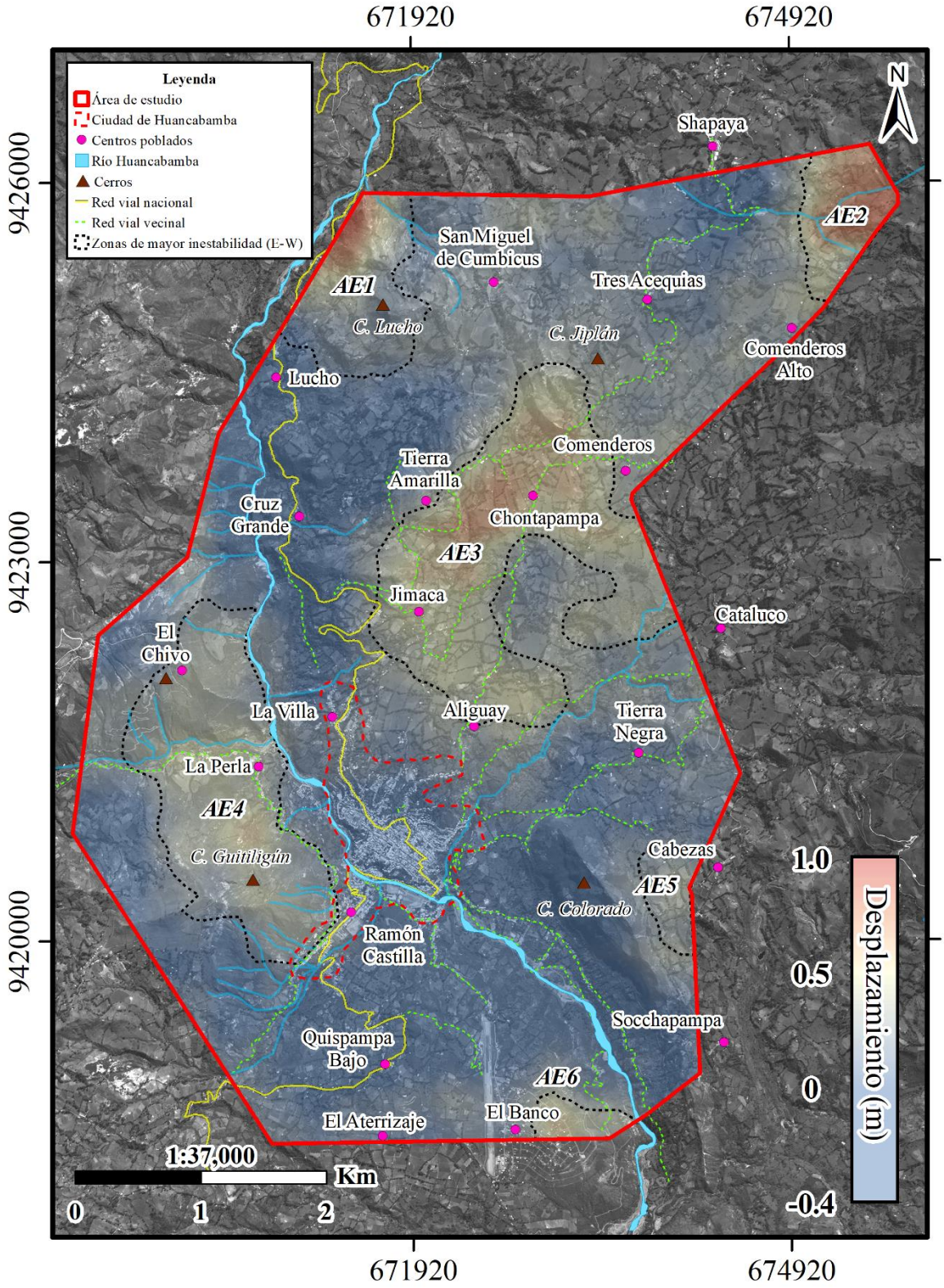


Figura 36. Mapa de desplazamientos horizontales Este-Oeste de la prueba NP12. Se muestran las 6 principales zonas de mayor deformación superficial con dirección de desplazamiento preferencial hacia el este, en tonos rojizos y delimitadas por líneas negras entrecortadas. Estas zonas presentan magnitudes desde ~ 0.80 m hasta ~ 1.0 m, mientras que las zonas en tonos azules representan las regiones las zonas con dirección preferencial hacia el oeste y sus magnitudes varían desde cero (zonas estables) hasta los 0.40 m.

4.5.3 Desplazamientos horizontales N-S

En la figura 37 se observa las 11 zonas de mayor deformación determinadas en el análisis a la banda N-S de la prueba NP12. En general estas zonas presentan magnitudes de 0.001 m hasta 0.28 m (Tabla 14). Debido a los falsos desplazamientos presentes en las zonas AN1 y AN2, estás se excluyen del análisis. La zona AN3 está muy cerca de AN1, al norte del centro poblado de San miguel de Cumbicus y del cerro Lucho. Tiene forma alargada y su región oeste colinda con una quebrada emergente del rio Huancabamba. Abarca un área de 0.37 Km^2 y en ella se estimaron desplazamientos con magnitudes de 0.01 m hasta ~ 0.13 m. Luego, siguiendo en dirección hacia el sur de la zona AN3, se ubica AN4, ocupando una gran superficie de 2.03 Km^2 y delimitado por un perímetro de 8.07 Km. Se extiende desde el centro poblado Lucho pasando por la parte sureste del cerro Lucho, hasta alcanzar la parte oeste del cerro Jiplán, al norte de Tierra Amarilla. Las magnitudes de los desplazamientos medidos en dicha región oscilan desde 0.04 m a ~ 0.26 m**.**

Por otro lado, al este de AN4 se encuentra AN5 con una extensión de 0.35 Km^2 con y ubicándose entre los centros poblados de Comenderos y Comenderos Alto, aproximadamente a un kilómetro al este del cerro Jiplán. La inestabilidad es baja, comprada con el resto de zonas y presenta magnitudes de desplazamientos desde 0.005 m hasta ~ 0.07 m. Mientras que la zona AN6, con0.29 Km^2 de superficie, se encuentra al sur de AN4, a 0.30 Km del centro poblado Cruz Grande y presenta magnitudes de desplazamientos que oscilan entre 0.003 m hasta ~ 0.07 m. Más al sureste de AN6 se encuentra la zona AN7, con una superficie de 1.29 Km^2, comprometiendo los centros poblados de Jimaca y Aliguay con de desplazamientos que oscilan entre 0.007 m hasta ~ 0.16 m. La zona AN8, presenta desplazamientos de 0.02 m hasta ~0.18 m. Cuenta con un área de aproximadamente 0.90 Km^2 y perímetro de 3.72 Km. Esta región se desplaza en dirección preferencial norte, hacia las quebradas Ungulo y Cojunda, y compromete la seguridad física del centro poblado Tierra Negra. Luego, más al sur de AN7, se encuentra la AN9, abarcando la parte noreste de la de la ciudad de Huancabamba (barrio Chalaco y Jibaja Che) y cruza la prolongación sur de la quebrada Ungulo, aproximadamente a medio kilómetro del cerro Colorado. Presenta desplazamientos de 0.01 m hasta ~ 0.16 m con extensión superficial de 1.02 Km^2.

Con desplazamientos que oscilan entre 0.002 m hasta ~ 0.28 m, la región AN10 se encuentra ubicada entre el cerro Guitiligún y El Chivo, en donde estas deformaciones superficiales de

desplazan hacia el norte, a una quebrada que nace aproximadamente a 0.26 Km del centro poblado La Perla, en el rio Huancabamba. Comprende una extensión superficial de 2.02 Km^2 y está delimitado por un perímetro aproximadamente de 7.15 Km. Por otro lado, AN11 se extiende por el margen derecho del barrio Ramón Castilla hasta el sur del centro poblado Quispampa Alto. Su superficie abarca 1.17 Km^2 y presenta tendencia de dirección de desplazamiento hacia la quebrada más cercana. En esta zona se estimaron desplazamientos de 0.001 m hasta ~ 0.18 m. Mientras que, en la parte sur del cerro Colorado, se encuentra AN12 ocupando una superficie ~ 0.53 Km^2. Se extiende en ambos márgenes del rio Huancabamba y al norte, ~ 1.36 Km del centro poblado El Banco. Las magnitudes de los desplazamientos encontrados en esta zona oscilan entre 0.07 m a ~ 0.26 m con dirección noroeste, hacia la ciudad de estudio. El análisis final se centra en la zona AN13, la cual es la más pequeña de todas y se encuentra muy al sur del área de estudio, a las afueras del centro poblado El banco. Su superficie abarca 0.16 Km^2 y los desplazamientos presentes en esta región oscilan entre 0.01 m a 0.07 m, con dirección preferencial hacia el rio Huancabamba. Exceptuando AN1 y AN2, todas estas zonas representan el 31.5% del área total del área de estudio. Mientras que las áreas con tonos amarillos, representan las zonas más estables, es decir que las magnitudes de desplazamientos estimadas tienden a cero (<0.001).

DESPLAZAMIENTOS N-S			
Zonas	**Área (km^2)**	**Perímetro (km)**	**Rango de desplazamiento (m)**
AN3	0.37	4.39	0.01 – 0.13
AN4	2.03	8.07	0.04 – 0.26
AN5	0.35	2.36	0.005 – 0.07
AN6	0.29	2.02	0.003 – 0.07
AN7	1.29	4.54	0.007 – 0.16
AN8	0.90	3.72	0.02 – 0.17
AN9	1.02	4.27	0.01 – 0.16
AN10	2.02	7.15	0.002 – 0.28
AN11	1.17	4.28	0.001 – 0.18
AN12	0.53	3.34	0.07 – 0.26
AN13	0.16	1.57	0.01 – 0.07

Tabla 14. Resumen de las zonas de mayor deformación superficial terrestre con sus respectivos rangos de desplazamientos horizontales N-S, determinados en la prueba NP12.

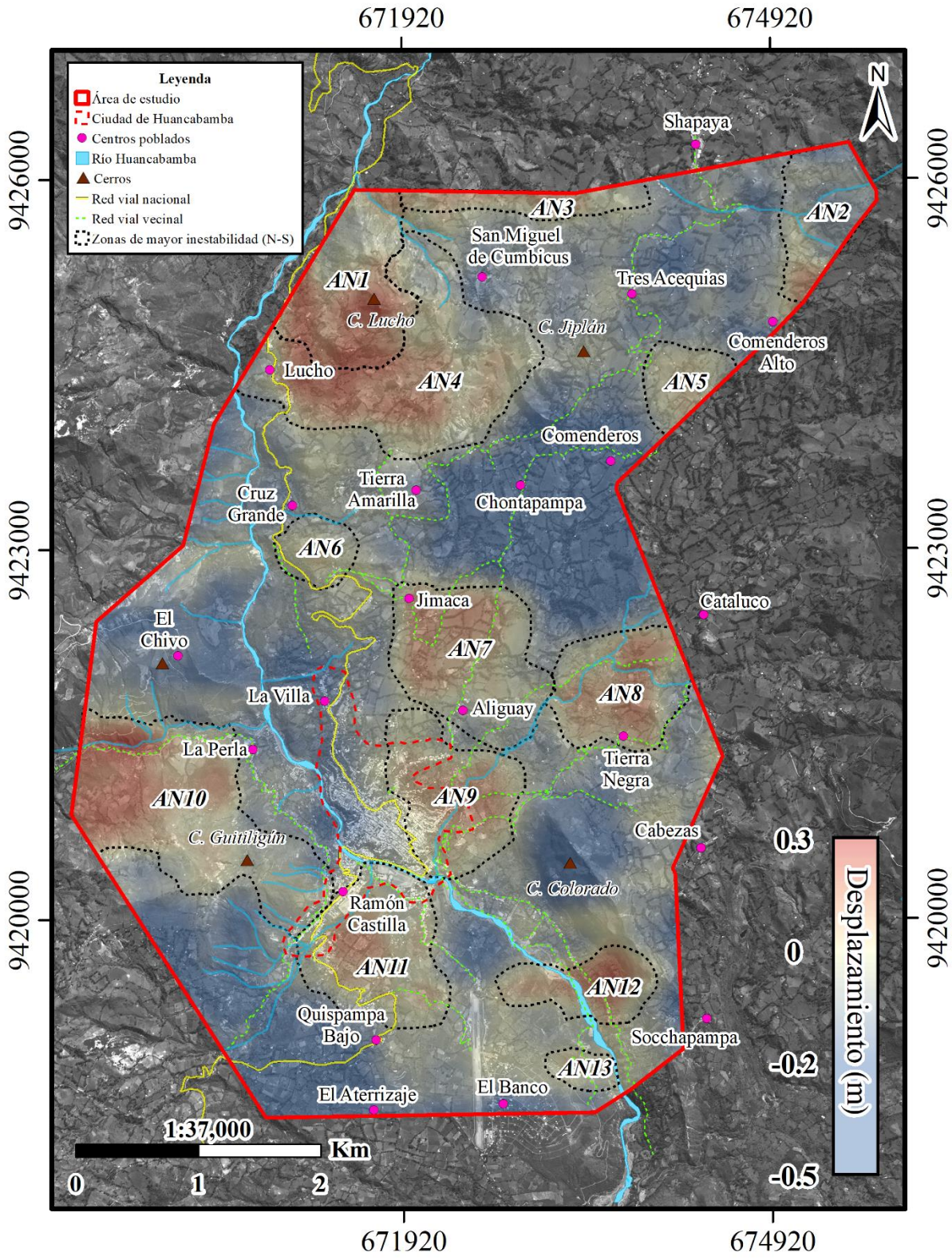


Figura 37. Mapa de desplazamientos horizontales Norte--Sur de la prueba NP12. Se muestran las 11 principales zonas de mayor deformación superficial con dirección de desplazamiento preferencial hacia el norte, en tonos rojizos y delimitadas por las líneas negras entrecortadas. Estas zonas presentan magnitudes desde ~ 0.006 m hasta 0.26 m, mientras que las zonas en tonos azules representan las regiones las zonas con dirección preferencial hacia el sur y sus magnitudes varían desde cero (zonas estables) hasta los 0.50 m.

4.5.4 Desplazamientos Resultantes

En la figura 38 se muestran los desplazamientos resultantes de la prueba NP12, que fueron obtenidos al aplicar la ecuación 13 a las dos componentes horizontes (E-W y N-S) de la correlación subpíxel, dentro de una ventana temporal de 420 días. Los resultados alcanzan, en algunas zonas, magnitudes aproximadamente de 0.70 m de desplazamiento (exceptuando las zonas AR1 y AR2). Se identificó 11 zonas de mayor deformación superficial (ver tabla 15). En general las regiones en rojo y naranja presentan deslizamientos de grandes magnitudes, mientras que las áreas en morado magnitudes menores que 0.30 m.

La primera zona de mayor deformación es AR3, se extiende a lo largo del límite norte del área de estudio, al norte del centro poblado de San Miguel de Cumbicus, presentando un área total de 0.19 Km^2 y delimitado por un perímetro de 2.25 Km. Lleva siendo afectada por desplazamientos con magnitudes de 0.35 m hasta 0.43 m y está asentada sobre una superficie terrestre con pendientes con valores entre 9° a 30° y orientadas al sureste (205° - 230°) y noreste (309° - 334°).

Por otro lado, la zona AR4 comprende un área de 0.52 Km^2 y presenta desplazamientos con magnitudes de 0.19 m hasta 0.32 m. Se encuentra ubicada al sureste del cerro Luco, aproximadamente a 0.5 Km. Colinda con la zona AR1 y está al oeste de San Miguel de Cumbicus. Esta zona es muy elevada (2204 m.s.n.m a 2390 m.s.n.m) con valores de pendientes de 3° a 29°, y orientaciones hacia el noreste, en dirección pendiente abajo del cerro Lucho, hacia la quebrada que se dirige al rio Huancabamba.

Más al noreste de AR4 se encuentra la zona AR5, entre los centros poblados de Comenderos y Comenderos Alto, aproximadamente a 0.86 Km al sureste del cerro Jiplán. Abarca una superficie de 0.41 Km^2 con perímetro de 2.55 Km y la inestabilidad producto de los desplazamientos presentes, oscila entre 0.31 m hasta ~ 0.37 m.

La región AR6 es la más grande de todas y abarca 4.30 Km^2 de superficie terrestres (13.4 % del área total de estudio) y un perímetro de 12.63 Km. Está ubicada al norte de la ciudad de Huancabamba, se extiende a través de los centros poblados de Comenderos, Chontapampa, Tierra Amarilla, Jimaca, la parte norte de Aliguay, hasta llegar a las quebradas Ungulo y Cojunda. Esta zona concentra gran inestabilidad en toda su extensión y en ella se estimaron

desplazamientos con magnitudes de 0.34 m hasta ~ 0.83 m. Las mayores magnitudes de deformación se encuentran entre Tierra Amarilla y Chontapampa. En toda la región AR6 se presentan relieves con pendientes entre 3° y 37° aproximadamente, y en promedio están orientadas hacia el sureste (Quebrada Ungulo y Cojunda).

Al oeste de Tierra Amarilla y al norte de Cruz Grande, se ubica la zona AR7, la cual es la más pequeña de todas. Su superficie abarca 0.08 Km^2 y perímetro de 1.12 Km los desplazamientos presentes en esta región oscilan entre 0.29 m a 0.42 m, con dirección preferencial del pendiente (6°-44°) hacia el sureste (226°-247°) y este (249°-277°).

La octava región analizada es AR8, ocupa una superficie de 0.33 Km^2 y está delimitada por un perímetro de 2.70 Km. Se extiende por la parte norte del centro poblado Tierra Negra y esta gran masa se desplaza en dirección hacia la quebrada Cojunda. Las magnitudes de los desplazamientos encontrados en esta zona oscilan de ~ 0.29 m a ~ 0.38 m con dirección noreste y su relieve presenta pendientes de 8° a 27°.

Por otro lado, se determinó que la zona AR9, ubicada al margen derecho del cerro Colorado y a medio kilómetro al suroeste del centro poblado Cabezas, presenta desplazamientos resultantes de 0.25 m hasta ~ 0.42 m. Cuenta con un área de aproximadamente 0.41 Km^2 y perímetro de 2.83 Km. Estos desplazamientos se dirigen lentamente hacia el sureste y en otras partes hacia el norte.

Más al sur de AR9 y en la parte este del centro poblado El Banco, se encuentra AR10, con presencia de desplazamientos con magnitudes de 0.17 m hasta ~ 0.64 m. Abarca una superficie similar a AR9, con 0.42 Km^2 y está delimitado por un perímetro aproximadamente de 2.69 Km. Los desplazamientos presentes, tienen dirección de movimiento preferencial hacia el margen izquierdo del rio Huancabamba.

Siguiendo en dirección hacia el oeste de AR10, se ubican las zonas AR11 y AR12, las cuales ocupan pequeñas extensiones superficiales de 0.11 Km^2 y 0.18 Km^2 respectivamente y están delimitados por perímetros de 1.25 Km y 1.62 Km respectivamente. Ambas regiones están al oeste del centro poblado El Aterrizaje y al suroeste de Quispampa Bajo. Las magnitudes de los desplazamientos resultantes encontrados en AR11 oscilan entre 0.33 m a ~ 0.45 m, mientras que para AR12 entre 0.31 m hasta 0.42 m.

Finalmente, se delimitó la zona AR13 con perímetro de 8.83 Km y una superficie que abarca 2.48 Km^2. Se extiende desde el cerro El Chivo, pasando por la quebrada que nace del rio Huancabamba, aproximadamente a 0.26 Km del centro poblado La Perla, hasta alcanzar la parte noreste del cerro Guitiligún y abarcando la parte suroeste del barrio Ramón Castilla. Es la tercera zona de mayor inestabilidad, después de AR6 y AR10 con magnitudes de desplazamientos resultante que van desde 0.28 m hasta ~ 0.63 m. Presenta pendientes con valores mayores a 45° en áreas cercanas al Barrio Ramón Castilla y con orientación hacia este mismo. Mientras que en el este del sector se encuentran pendientes desde 7° hasta 41°, con orientaciones de preferencia hacia el noreste. En esta sección también se describió de forma superficial las pendientes y sus orientaciones presentes en las zonas de mayor desplazamiento resultante, pero en el capítulo 5 se analiza más detalladamente estas características para cada zona.

En conclusión, las 11 zonas determinadas representan el 29.2% del área total de estudio. Esto quiere decir que la seguridad física de 9.38 Km^2 del área propuesta perteneciente al polígono con perímetro de color rojo (ver figuras 42), están comprometidos con desplazamientos de magnitudes oscilantes entre ~ 0.17 m a ~ 0.83 m.

DESPLAZAMIENTOS RESULTANTES			
Zonas	**Área (km^2)**	**Perímetro (km)**	**Rango de desplazamiento (m)**
AR3	0.19	2.25	0.35 – 0.43
AR4	0.52	3.43	0.19 – 0.32
AR5	0.41	2.55	0.31 – 0.37
AR6	4.30	12.6	0.34 – 0.83
AR7	0.08	1.12	0.29 – 0.42
AR8	0.33	2.70	0.29 – 0.38
AR9	0.41	2.83	0.25 – 0.42
AR10	0.43	2.69	0.17 – 0.64
AR11	0.11	1.25	0.33 – 0.45
AR12	0.18	1.62	0.31 – 0.42
AR13	2.48	8.83	0.28 – 0.63

Tabla 15. Resumen de las zonas de mayor deformación superficial terrestre con sus respectivos rangos de desplazamientos resultantes, determinados en la prueba NP12.

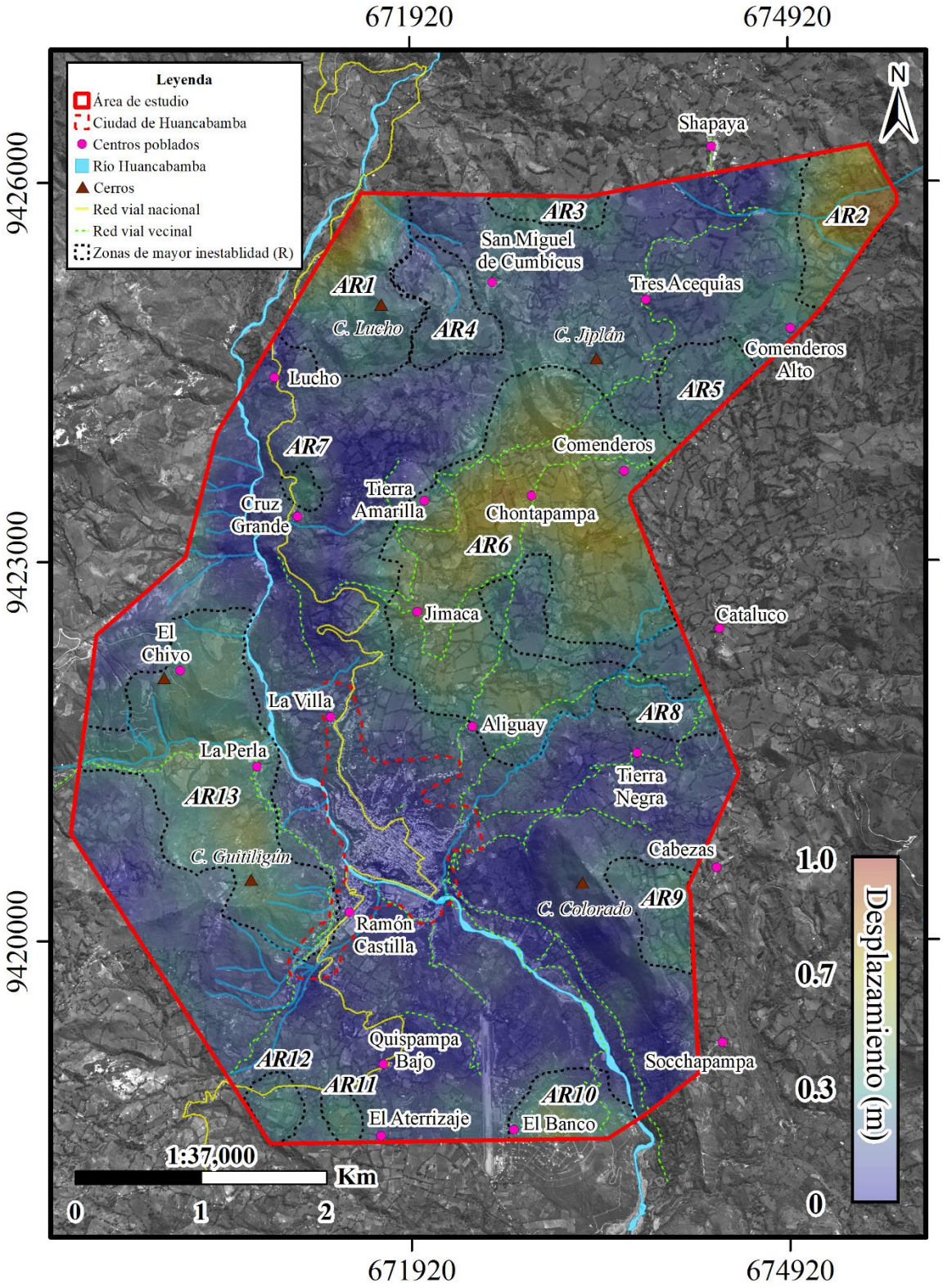


Figura 38. Mapa de desplazamientos resultantes de la prueba NP12. Se muestran las 11 principales zonas de mayor deformación superficial, la cuales presentan desplazamientos aproximadamente entre 0.17 m hasta 0.83 m, mientras que las zonas en tonos morados representan las regiones con menores magnitudes de desplazamientos.

4.6 Determinación del tipo de movimiento en masa

Debido a que los procesos aplicados en la presente tesis están basados netamente en algoritmos y procesamientos correspondientes al sensoramiento remoto, no se cuenta con información in situ de la zona de estudio, es por eso que para una correcta clasificación del tipo de movimiento en masa presente en cada zona de mayor deformación superficial, se realiza la correlatividad con los resultados de las investigaciones morfodinámicas, geológicas y geodésicas, con el objetivo de complementar y desarrollar resultados más completos sobre la caracterización de los movimientos en masa. Al igual que la presente tesis, estos estudios también fueron desarrollados dentro del marco general del proyecto: *"Evaluación Geodinámica, Geofísica Y Geología De Los Deslizamientos De Tierra Que Afectan La Seguridad Física De La Ciudad Huancabamba (Piura)"*, y sus resultados están plasmados en informes y documentos, generados con datos medidos directamente del área de estudio.

En la figura 39 se presenta las zonas de movimientos en masa del estudio morfodinámico propuestos por Córdova (2019) representados por polígonos con perímetros punteados. Los de color negro y gris claro, representan las zonas de mayor deformación superficial de la prueba NP12 y NQ1 respectivamente. Se determinó que la zona HC1, presenta desplazamientos desde 0.09 m hasta – 0.25 m, muy lentos ($1.6x10^{-6}$ mm/s - $4.9x10^{-6}$ mm/s), producto de deslizamientos activos del tipo rotacional y traslacional, de acuerdo a la correlatividad con los resultados de Córdova (2019). Las regiones que abarcan los deslizamientos rotacionales activos (polígonos con línea de trazo rojo) se extienden por casi toda la ciudad y comprometen la seguridad física de todos los barrios al margen derecho del rio Huancabamba y exceptuando parte del barrio Ramón Castilla (margen izquierdo), en donde los desplazamientos son de baja magnitudes (< 0.15 m). Mientras que los deslizamientos traslacionales activos (polígonos con línea de trazo verde), están presentes al noreste de los límites de la ciudad, aproximadamente cerca de las calles Sagrado Corazón de Jesús y Madre de Dios, en el barrio Jibaja Che. Por otro lado, la región con delimitada por el polígono con línea de trazo morada, representa la ubicación de la zona de reptación, la cual abarca desde la parte norte de la municipalidad de la ciudad, pasando por la plaza principal y la iglesia San Pedro, hasta llegar a El Camal, muy cerca del rio Huancabamba.

Externamente a la ciudad de Huancabamba, hay predominancia de deslizamientos del tipo Rotacional y traslacional, ya sea activos o inactivos (polígonos con línea de trazo amarilla).

Principalmente las zonas de mayor deformación superficial como VF7 y la parte sur de VF6, presentan deslizamientos del tipo rotacional activo, mientras que la parte este de la zona VF3, la región suroeste de VF7, las partes norte y sur de VF13, la parte oeste (cerca al centro poblado Jimaca) de la zona VF6 y al norte de VF10, presentan deslizamientos de grandes extensiones, pero inactivos.

En zonas como VF4, VF5, VF8, VF9, VF11, VF12 y en partes del resto de zonas, no presentan las superposiciones de los polígonos con algún tipo de deslizamientos, por lo que se plantea que son zonas donde se desarrollaron posibles nuevos movimientos en masa. La clasificación del tipo de estos deslizamientos solo es verificable con estimaciones geológicas y organización del tipo del suelo, realizadas in situ, ya que, con la metodología propuesta en la presente tesis, se limita a solo obtener las caracterices dinámicas correspondientes a cada superficie que ocupan. Se puede asignar algunos posibles principales factores que ayudaron a desencadenar los desplazamientos en dichas zonas, como por ejemplo la zona VF4 se encuentra parcialmente sobre un área con ambientes pantanosos con relieves cóncavos, lo cual indicaría una fuente aditiva para el tipo de suelo y se estaría directamente afectado y condicionado para el desenlace de algún tipo de movimiento en masa. De acuerdo a la hipótesis anterior, también se observa estos tipos de suelos en regiones de la parte norte de la zona VF6, parte este de VF3 y una pequeña región en el cerro Guitiligún.

En las zonas colindantes al cerro Guitiligún y el barrio Ramón Castilla, hay presencia de reptación de suelos (Figura 40), tal como lo demuestra los resultados del informe técnico de peligros geológicos en la ciudad de Huancabamba, elaborado por Villegas et al (2019) para el Instituto Geofisico del Peru (IGP). Estos resultados complemetan las estimaciones de los procesos de correacion subpixel para cada prueba y ayudan a sustentar su coherencia. De esta manera, las zonas de desplazamientos propuestas en aquel informe, coinciden notablemente con las zonas ZR2 y ZR3, de la seccion 4.4.3, las cuales indican las zonas con mayores magnitudes de desplazamiento dentro de la ciudad de Huancabamba.

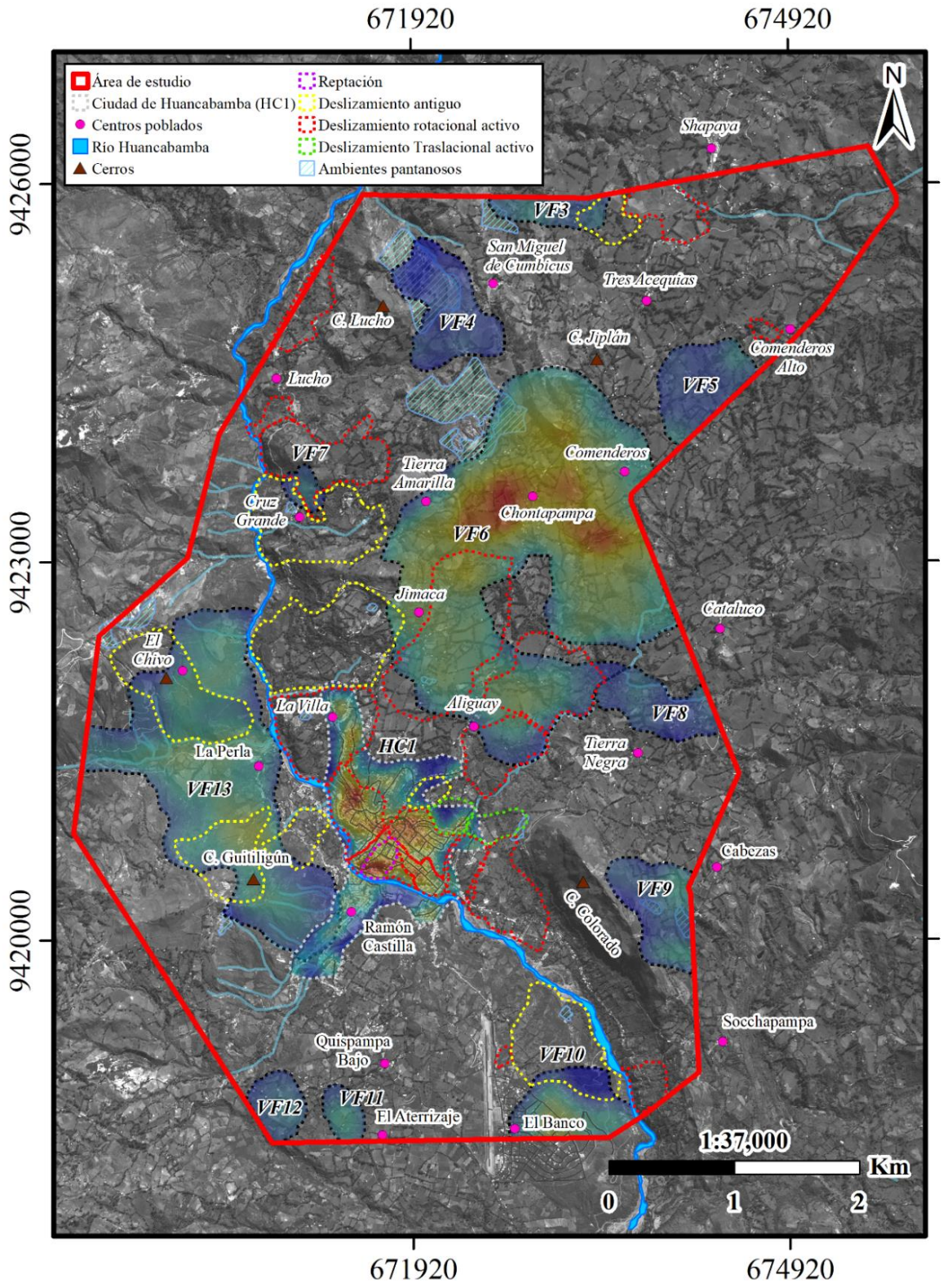


Figura 39. Correlatividad entre las extensiones superficiales terrestres de las zonas determinadas de deslizamientos, propuestos por Córdova (2019), sobre las zonas de mayor deformación superficial de acuerdo a los resultados de las pruebas NQ1 y NP12.

Se recalca nuevamente que las quebradas y los canales de regadío, dispersos por toda el área de estudio, juegan un papel importante con respecto al alcance y distribución de las zonas más afectadas por los movimientos en masa, ya que, como se observó en los resultados, la mayor parte de las zonas de deformación están orientadas hacia estos lugares, lo cual indicaría la fuerte influencia del paso del agua a través de ellos y para la posible activación de desplazamientos. Esto significa que, la presencia de la mala distribución del agua a través de estos medios, significaría a futuro, la perdida de muchas zonas habitables y de cultivos, dentro y externamente a la ciudad de Huancabamba.

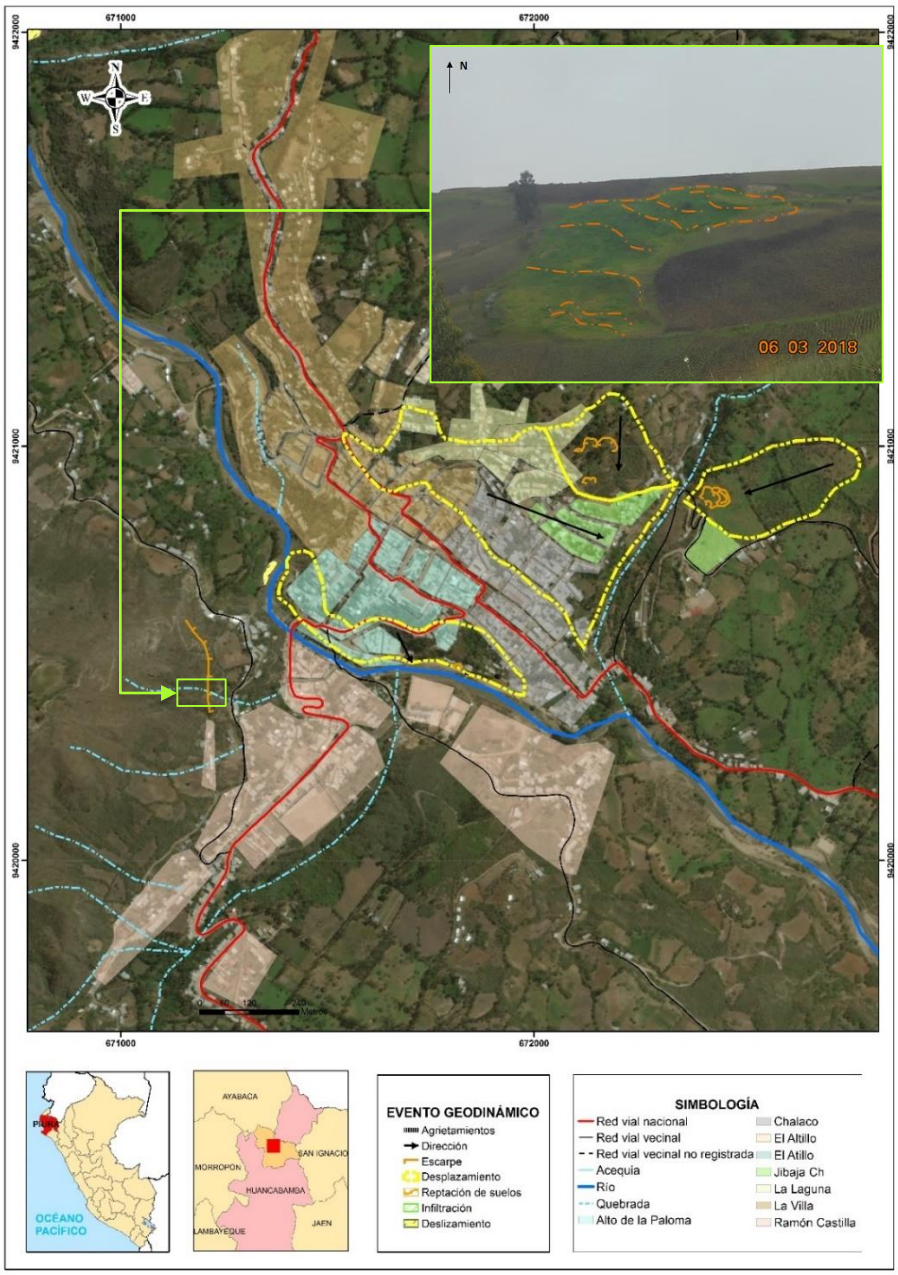


Figura 40. Identificación de zonas con problemas de reptación de suelos en el centro urbano de Huancabamba. Las zonas delimitadas con líneas amarillas representan las extensiones de las regiones con presencia de desplazamientos. Adaptado de Villegas et al (2018).

4.7 Alcance de los movimientos de masa

En la Figura 41 se observa los polígonos que representan el alcance de todas las zonas de mayor deformación superficial, determinadas en las pruebas NQ1 y NP12. Hay una notable presencia acumulativa de dichas zonas en la parte norte del área de estudio. Los polígonos de rayas amarillas, representan los alcances de los resultados determinados por Córdova (2019). Por otro lado, las regiones que no están cubiertas por las zonas de color rojo o amarillo, podrían considerarse estables (sin tener en cuenta los factores de sismicidad y precipitación), por lo que son muy importantes para ser propuestos como lugares para una posible reubicación a futuro de las viviendas y familias presentes en las zonas de mayor riesgo del área de estudio, hacia dichas zonas.

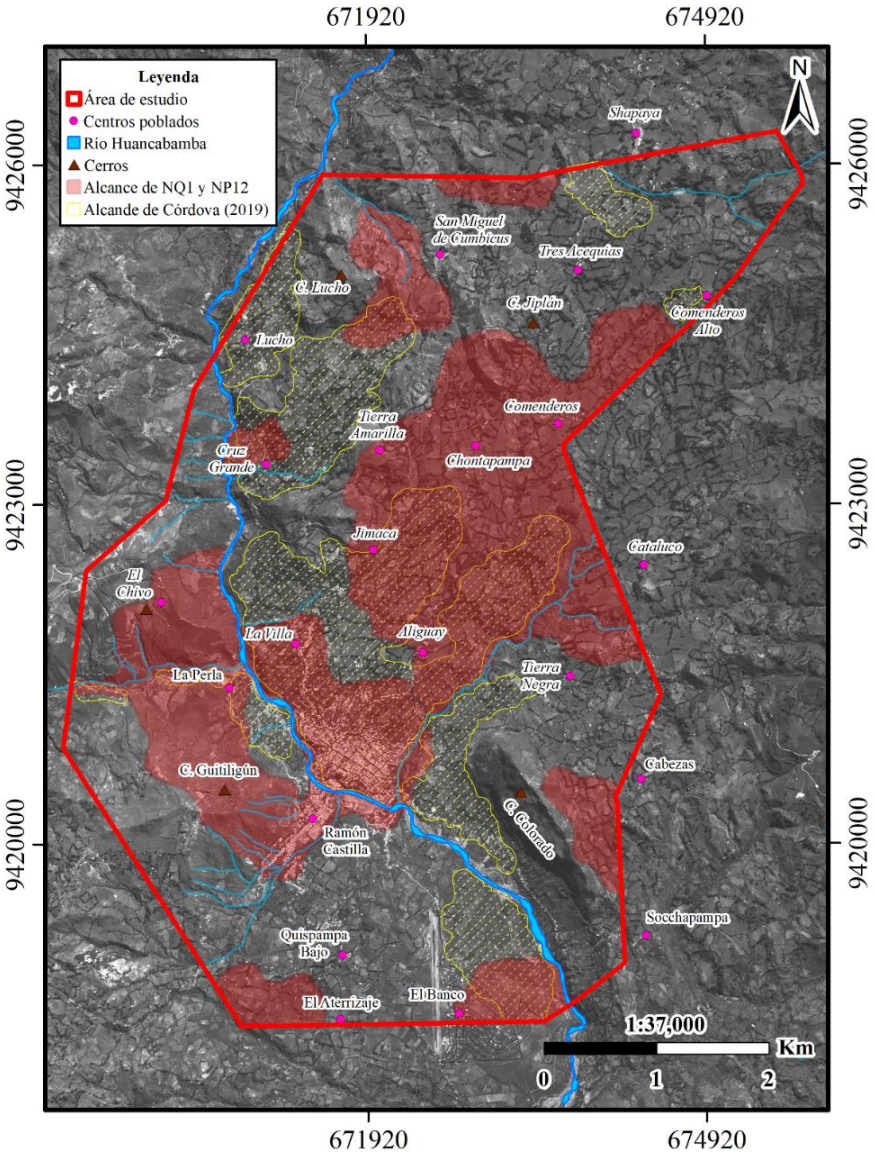


Figura 41. Mapa de distribución superficial del alcance de los movimientos de masa de las pruebas NQ1 y NP12 (polígonos rojos) y del alcance de las áreas afectadas por procesos de remoción en masa, propuestos por Córdova (2019) (polígonos con rayas amarillas).

4.8 Análisis entre magnitudes de desplazamientos

De igual manera que en la sección 4.7, para seguir con la validación de los resultados, ahora el análisis se centra específicamente en una determinada cantidad de puntos dispersos (estaciones Geodésicas) en el área total de estudio, de esta forma se realiza el análisis de dicha área en base a los desplazamientos registrados por cada punto. Luego se compara los registros de las estimaciones geodésicas con las medidas obtenidas por la correlación subpíxel y con ello se estima cuan lejano son los resultados de la correlación subpíxel en base a los datos medidos por las estaciones GPS. Para lograr este objetivo, se recurre a la determinación de la Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE), la cual indicará el ajuste absoluto del modelo (estimaciones GPS) a los datos y mostrará cuán cerca están las estimaciones observados de los valores predichos del modelo (resultados de correlación). En la tabla 16 se muestra las ubicaciones de las 32 estaciones geodésicas, dispersas en toda el área de estudio, en base al Sistema de Coordenadas Geográficas. Para los procesos posteriores como el análisis comparativo de los desplazamientos resultantes y la estimación de la RMSE, se ha obviado la estación PORV por encontrarse muy alejada y fuera del área de estudio.

Estación	Ubicación		Estación	Ubicación	
	Latitud	Longitud		Latitud	Longitud
PI04	-5.23840	-79.45030	HB11	-5.23310	-79.44470
PG01	-5.23830	-79.43700	HB12	-5.24340	-79.43170
PG02	-5.24220	-79.46370	HB13	-5.25010	-79.46380
PG03	-5.22520	-79.46480	HB14	-5.25850	-79.44280
PG04	-5.20550	-79.44310	HB15	-5.25920	-79.45510
PG05	-5.19420	-79.42100	HB16	-5.24200	-79.45880
PG06	-5.22450	-79.44030	HB18	-5.25140	-79.44380
HB01	-5.19810	-79.44040	HB19	-5.23970	-79.44430
HB02	-5.19640	-79.42930	HB21	-5.23900	-79.45080
HB04	-5.20080	-79.44970	HB22	-5.24230	-79.45080
HB05	-5.20760	-79.45850	HB23	-5.24070	-79.45000
HB06	-5.21260	-79.45000	HB24	-5.23640	-79.45250
HB07	-5.21510	-79.44010	VT02	-5.22990	-79.45430
HB08	-5.21910	-79.43150	VT03	-5.24480	-79.44170
HB09	-5.22030	-79.44770	VT04	-5.24290	-79.45470
HB10	-5.23190	-79.42730	PORV	-5.10230	-79.48110

Tabla 16. Ubicaciones de las 32 estaciones geodésicas, en coordenadas geográficas.

Las mediciones por parte de los instrumentos GNSS, se realizaron en dos campañas. La primera se desarrolló desde el 10 de julio hasta el 29 de julio del 2018 (19 días), mientras que la segunda campaña se efectuó desde el 3 de agosto hasta el 26 de agosto del 2019 (23 días), resultando un total de 42 días, en donde se estimaron los desplazamientos en la superficie terrestre. La tabla 17 muestra las magnitudes de los desplazamientos resultantes, de acuerdo a cada estación en los 42 días de medición y las estimaciones determinadas en cada prueba de correlación subpíxel, respecto al mismo tiempo de 42 días.

Estaciones	**Desplazamiento resultante (m)**		
	GNSS	**NQ1**	**NP12**
PI04	0.005372584	0.01164165	0.0145672
PG01	0.001175349	0.00094468	0.0181879
PG02	0.006369661	0.00199772	0.0307965
PG03	0.005261259	0.00202365	0.0421187
PG04	0.131234147	0.00160015	0.0269635
PG05	0.004288688	0.00246935	0.0532517
PG06	0.433028297	0.00102021	0.0335302
HB01	0.02815585	0.00122536	0.0294684
HB02	0.007630533	0.00300589	0.0279983
HB04	0.012375169	0.00232659	0.0354292
HB05	0.817584062	0.00221782	0.0225482
HB06	0.126576763	0.00116607	0.0107714
HB07	0.107539723	0.00392849	0.067983
HB08	0.102745751	0.0010653	0.0506148
HB09	0.12109424	0.00141439	0.057228
HB10	0.003950596	0.00462625	0.0255659
HB11	0.012028958	0.00506751	0.0273213
HB12	0.035190748	0.00324948	0.0332906
HB13	0.003285662	0.00213283	0.0289654
HB14	0.011504602	0.00180898	0.0260393
HB15	0.027100118	0.0041306	0.0324879
HB16	0.015873435	0.00222793	0.0472486
HB18	0.007304778	0.00197534	0.0106183
HB19	0.012344773	0.00653956	0.0110605
HB21	0.018730487	0.01096124	0.0126349
HB22	0.004955945	0.00463571	0.0054061
HB23	0.00714059	0.01031518	0.0085627
HB24	0.016593217	0.0116111	0.0138149
VT02	0.544183461	0.00597849	0.0310524
VT03	0.011738388	0.00337186	0.0117229
VT04	0.000621631	0.00467234	0.0310553

Tabla 17. Estimaciones de desplazamientos resultantes respecto a las 31 estaciones geodésicas distribuidas en el área total de estudio y las dos principales pruebas de correlación subpíxel.

Muchas de las mediciones realizadas por los instrumentos GNSS, son similares a las obtenidas con las dos pruebas de correlación subpíxel, como por ejemplo las magnitudes observadas en las estaciones PI04, HB21 y HB22. Pero también hay estimaciones muy contrastantes, como el caso de las estaciones HB05, HB06 y VT02. Recordar que las medidas tomadas en cada prueba, fueron realizadas en diferentes lapsos de tiempo, por lo que los resultados presentados en la tabla 17 son medidas aproximadas en base a las medidas geodésicas.

La manera más adecuada de cuantificar el "alejamiento" de las medidas de ambas pruebas de correlación subpíxel, respecto de las estimaciones geodésicas, es determinando la RMSE para cada prueba. Es por eso que en la tabla 18 se presenta las medidas RMSE de las 23 pruebas de correlación subpíxel desarrolladas.

Prueba	RMSE (m)	Prueba	RMSE (m)	Prueba	RMSE (m)	Prueba	RMSE (m)
NQ1	0.19773638	NP4	0.18829269	NP10	0.27253719	NP16	0.18778257
NQ2	0.18921566	NP5	0.19175873	NP11	4.60189785	NP17	0.17916174
NQ3	0.18339903	NP6	5.4166395	NP12	0.19120613	NP18	0.1892485
NP1	1.10399191	NP7	0.32102263	NP13	0.18748209	NP19	0.20757701
NP2	0.16338962	NP8	0.23456161	NP14	0.18517895	NP20	0.19389853
NP3	0.20909998	NP9	0.20210236	NP15	0.18386479		

Tabla 18. Estimaciones de RMSE de cada prueba de correlación subpíxel.

Como se observa en la tabla 18, hay diferentes medidas de RMSE para cada prueba, de las cuales se destaca las que son de menor magnitudes, ya que estas demuestran que los resultados estimados, son más cercanos o similares las estimaciones base (geodésicas). Al observar la gráfica comparativa de RMSEs en la figura 26, se plantea un interrogante que también fue descrita en la sección 4.1: ¿Por qué solo se eligió los resultados de las pruebas NQ1 y NP12, si hay otras pruebas con RMSE bajo y con posibles resultados semejantes a los de las medidas GNSS? Pues, para responder a esta pregunta hay que añadir dos puntos importantes a lo descrito en la sección 4.1: El primero es recordar que las RMSEs, son obtenidas a partir de datos como los que se observan en la tabla 17, es decir, se necesita una cierta cantidad de resultados que abarquen o comprendan parcialmente las ventanas temporales de las medidas base (campañas geodésicas), mientras que el segundo punto, es que estos resultados dependen a la vez, de las imágenes con que se desarrolló las pruebas de correlación subpíxel. Entonces, si las imágenes presentan un alto porcentaje de nubosidad y sombras, entonces los resultados de desplazamientos estarán plasmando buenas y falsas estimaciones a la misma vez, generando

muchas veces RMSEs con valores muy altos y contradictorios a los esperado, como en el caso de NQ1 Y NP11 (ver tabla 18).

Volviendo a la respuesta de la pregunta, el resto de pruebas, a excepción de NQ1 y NP12, no cumplen con ambos puntos planteados. Para tener otra perspectiva de lo propuesto anteriormente, tomar como ejemplo a los resultados de las pruebas NP12, NP13, NP14, NP20 y NQ1. Los desplazamientos presentes en base a la distribución de las estaciones GPS en el área de estudio correspondiente a cada prueba, se puede observar en la figura 42, que los resultados de las pruebas NQ1 (línea amarilla) y NP12 (línea verde), son las más cercanos a las estimaciones geodésicas y oscilan entre 0.0009 m y 0.067 m, por lo que son los más apropiados a ser analizados. Mientras que el resto de líneas, pertenecientes a los resultados de otras pruebas, se alejan de las medidas propuestas por las campañas geodésicas.

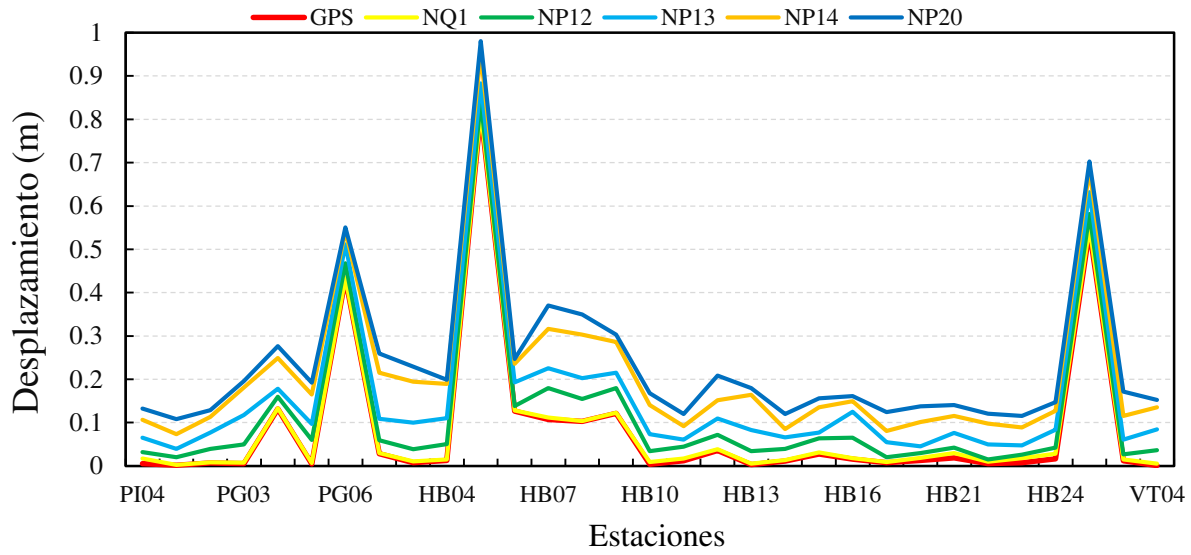


Figura 42. Estimaciones de desplazamientos resultantes a través de 5 pruebas de correlación subpíxel, en la distribución de 31 posiciones referenciales a las ubicaciones de estaciones GPS. Los resultados de las pruebas NQ1 y NP12, son las más cercanas a las mediciones geodésicas.

De la misma forma sucede con los resultados de las demás pruebas, como se observa en la figura 43, hay estimaciones de desplazamientos incoherentes que llegan a valores mayores que 13 m en solo 42 días, contradiciendo totalmente lo medido por los instrumentos GNSS y los resultados de otros estudios. Las medidas muy elevadas como las presentes en la gráfica de la figura 43, generalmente representan a estimaciones de desplazamientos muy lentos en grandes periodos de tiempo (>10 años), lo cual contradice las ventanas temporales estudiadas en la presente tesis (< 2 años). De forma representativa a los resultados de las demás pruebas, los resultados de las pruebas NP1, NP6 y NP11, muestran altas magnitudes de desplazamientos y

como se observa en la figura 43, dichas estimaciones no son cercanas a las medidas base (línea roja), las cuales tienden a cero, mientras que las otras llegan a tener valores mayores a 13 m, lo cual demuestra nuevamente la incoherencia respecto al corto lapso de tiempo de prueba y para proceder a un análisis posterior.

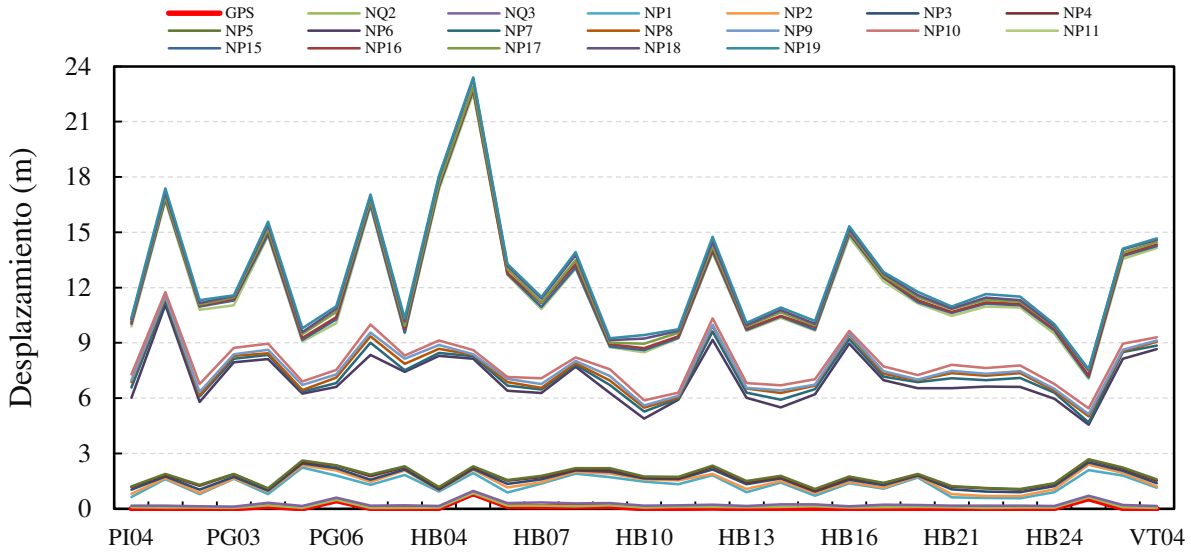


Figura 43. Comparación de medidas realizadas en puntos referenciales a las ubicaciones de las estaciones GPS, respecto a los resultados obtenidos de las pruebas NP1, NP6 y NP11 (de acuerdo a los 42 días de prueba), los cuales hacen referencia a la misma vez, a cuan alejados se encuentra los desplazamientos determinadas en el resto de pruebas.

4.9 Correlatividad entre desplazamientos, precipitación y sismicidad

Otra desventaja del uso de COSI-Corr es la limitada aplicabilidad de las imágenes satelitales para la estimación de los desplazamientos, ya que solo se utiliza dos imágenes (Principal y secundaria) para lograr este objetivo. Esto solo permite medir el desplazamiento horizontal total (acumulativo) durante toda la ventana temporal correspondiente a las dos fechas de ambas imágenes, impidiendo analizar la evolución de los desplazamientos a través del tiempo. Generalmente para este tipo de análisis, se utiliza varias imágenes dentro de un mismo proceso como, por ejemplo, en la Interferometría de Radar de Apertura Sintética (INSAR), la cual es una técnica más exacta en cuanto respecta a la cuantificación de desplazamientos, pero está limitada al análisis de zonas específicas ya que en relieves escarpados se mezclan sus contribuciones a nivel de pixel, cuando la pendiente excede el ángulo de incidencia del radar. Debido a estas limitaciones, muchas veces es preciso trabajar este tipo de técnicas (De correlación o interferometría) conjuntamente con mediciones geodésicas, para tener una base para las estimaciones que proporcione los resultados de cada técnica.

Es por esto que, en esta sección se analiza la correlatividad entre los eventos sísmicos, la precipitación y los desplazamientos estimados, a través del desarrollo de series de tiempo, de los datos de desplazamientos medidos por la estación geodésica PI04. En la tabla del apéndice H se muestra los principales sismos registrados desde 14 de julio del 2017 hasta 3 de julio del 2019. Se estimó posibles desplazamientos cosísmicos de baja magnitud causados por algunos de los eventos sísmicos presentes en la ventana temporal. Los desplazamientos medidos, están en escala milimétricas y no son mayores a 10 mm, a excepción de un desplazamiento cosísmico de aproximadamente 2 cm, producto del sismo de magnitud Mw de 8.0 ocurrido el 26 de mayo del 2019 en Lagunas, Loreto. Los datos de desplazamiento fueron proporcionados por el Instituto geofísico del Perú (IGP), que a su vez fueron ofrecidos por el Instituto Geográfico Nacional (IGN).

En la figura 44 se observa la ubicación de la estación PI04 y la estación meteorológica Huancabamba, en la municipalidad de la ciudad y en el barrio Ramón Castilla (suroeste de la ciudad), respectivamente. Desde el punto de vista geológico, PI04 se encuentra en una zona muy estable.

De las 32 estaciones geodésicas presentadas en la tabla 17, PI04 es muy importante, debido a que es una estación fija y estuvo midiendo los desplazamientos dentro de la ciudad de Huancabamba, desde el 19 de febrero del 2016 hasta el 31 de diciembre del 2018, luego hubo un lapso de tiempo donde no se obtuvo datos, hasta comenzar a medir nuevamente en el 19 de mayo del 2019 hasta el 26 de mayo del mismo año. Las series de tiempo para desplazamientos horizontales N-S y E-W, se observan en las figuras 45 y 46, respectivamente. Es notable ver que los desplazamientos en las zonas cercanas a la estación PI04, están dirigidos mayoritariamente hacia el oeste, como lo consta los signos menos en los datos de la gráfica de la figura 45, donde la medida más negativa es de 0.034 m hacia el oeste y fue estimada el 26 de mayo del 2019, el día donde también se desencadeno el sismo de magnitud Mw de 8.0.

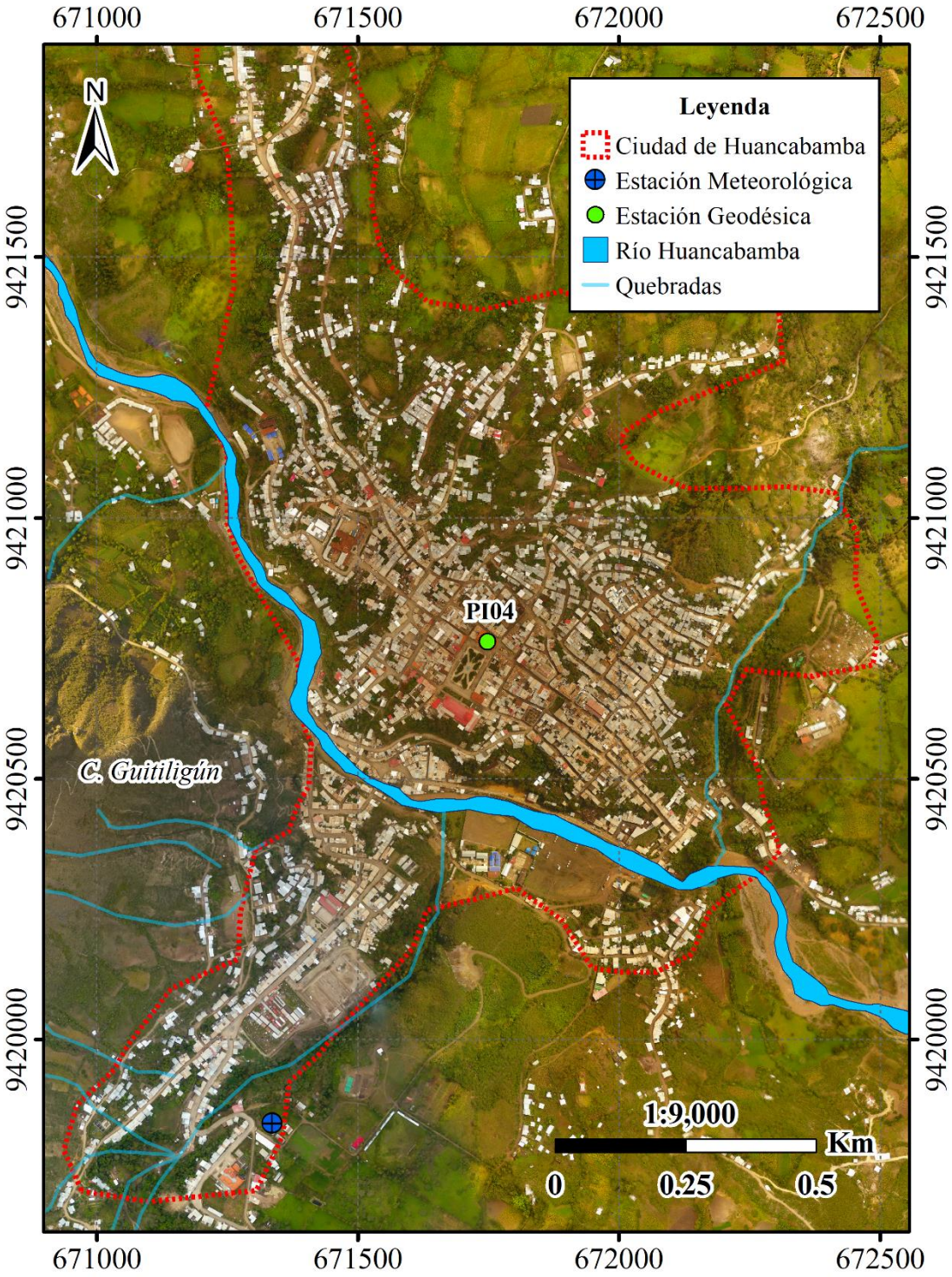


Figura 44. Ubicación de la estación geodésica PI04 y la estación meteorológica, en la ciudad de Huancabamba.

Por otro lado, en la figura 46 se observa los desplazamientos horizontales norte-sur, donde las medidas oscilan entre valores desde -0.00738 m hasta 0.01274 m y la máxima estimación fue realizada del 19 al 20 de enero del 2018, donde particularmente no ocurrieron sismos de magnitudes Mw mayores a 4.4, para determinar una correlación con esta elevada medida. Sin

embargo, como se observa en la figura 49, posiblemente esto se deba al cambio de pendiente por parte de la curva de precipitación acumulada (curva celeste) en el 19 de enero del 2018, lo cual también se ve reflejado en el cambio de pendiente para la curva de desplazamiento resultante (curva verde) en el mismo día. Con un cambio diferencial de 4.3 mm de precipitación acumulada entre ambos días.

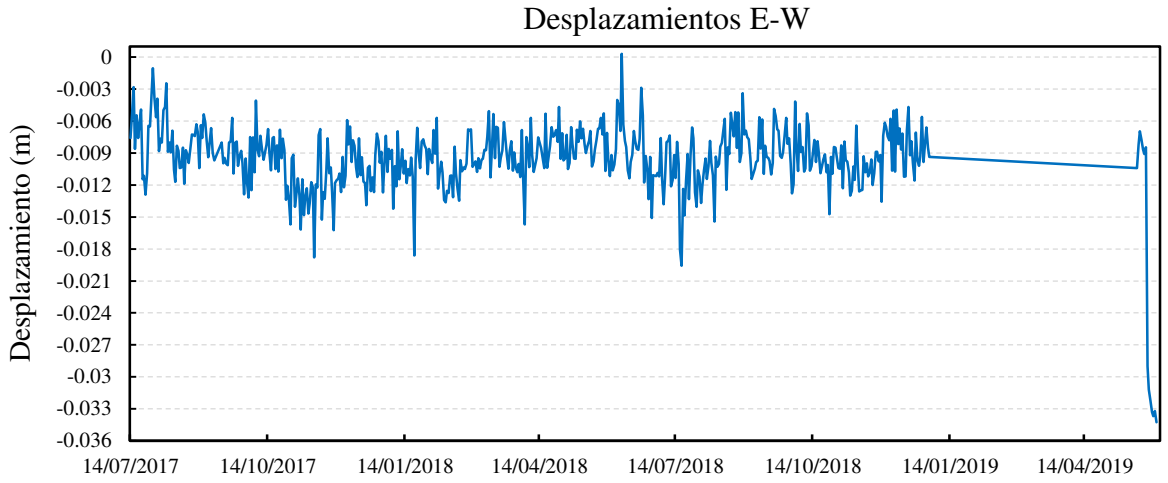


Figura 45. Serie temporal de PI04 con los desplazamientos horizontales Este-Oeste (E-W).

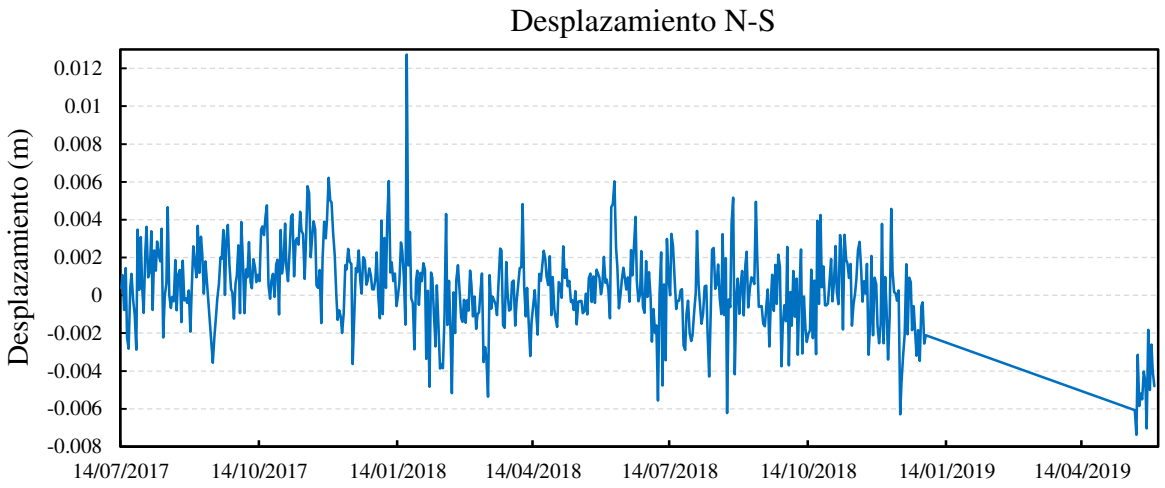


Figura 46. Serie temporal de PI04 con los desplazamientos horizontales Norte-Sur (N-S).

Luego en la figura 47 se presenta la serie de tiempo de la misma estación, pero con los desplazamientos resultantes, correspondientes a la composición de ambas bandas (E-W y N-S). En el fondo se encuentra la curva celeste que muestra la precipitación acumulada por día, la cual ofrece una vista a la evolución paralela entre ambas curvas y la posible existencia de una relación entre ambos parámetros. Por otra parte, en la figura 48 se muestra la misma curva de desplazamientos resultantes, pero conjuntamente con la curva de precipitación acumulada a través de los días en toda la ventana temporal. Cabe mencionar que un análisis a simple vista no ofrece la diferencia de desplazamientos a través de los días ya que las medidas están a

escalas milimétricas, pero si se analiza por secciones como por ejemplo en la figura 49, se puede encontrar que en algunas regiones de las curvas hay correlatividad en los cambios de pendientes en ambas curvas, demostrando que el aumento de precipitación conlleva al aumento de las magnitudes de desplazamiento. Para este caso se encontraron aumento en escala milimétricas (>2 mm). Es posible que, si se tuviera muchas más estaciones funcionando de forma permanente durante un gran lapso de tiempo, se podría estimar con mucha más precisión las medidas exactas de relación existente entre la precipitación acumulada y los desplazamientos.

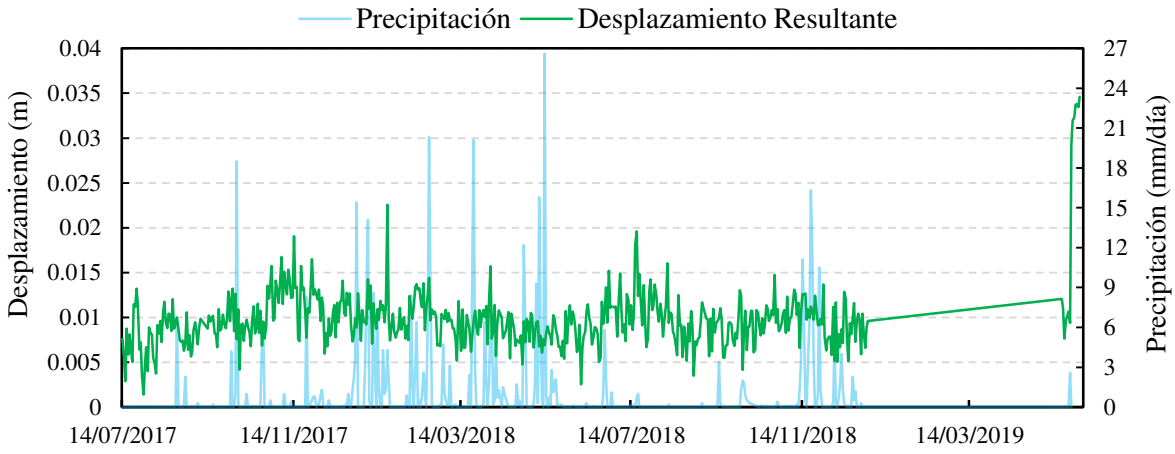


Figura 47. Serie de tiempo de desplazamientos resultantes (curva verde), calculados con los datos de la estación GPS permanente (PI04). La curva celeste representa la precipitación acumulada por día y fue registrada por la estación meteorológica Huancabamba desde el comienzo de la temporada de menor precipitación (julio de 2017).

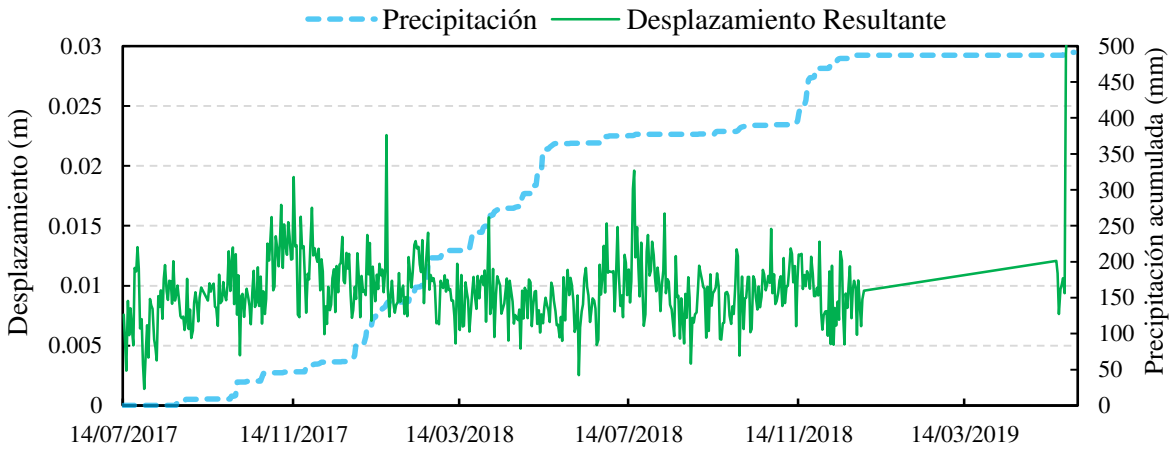


Figura 48. Serie de tiempo con los desplazamientos resultantes (curva verde), calculados a partir de los datos de la estación GPS permanente (PI04). La curva celeste representa la precipitación acumulada a través de los días y fue registrada por la estación meteorológica Huancabamba.

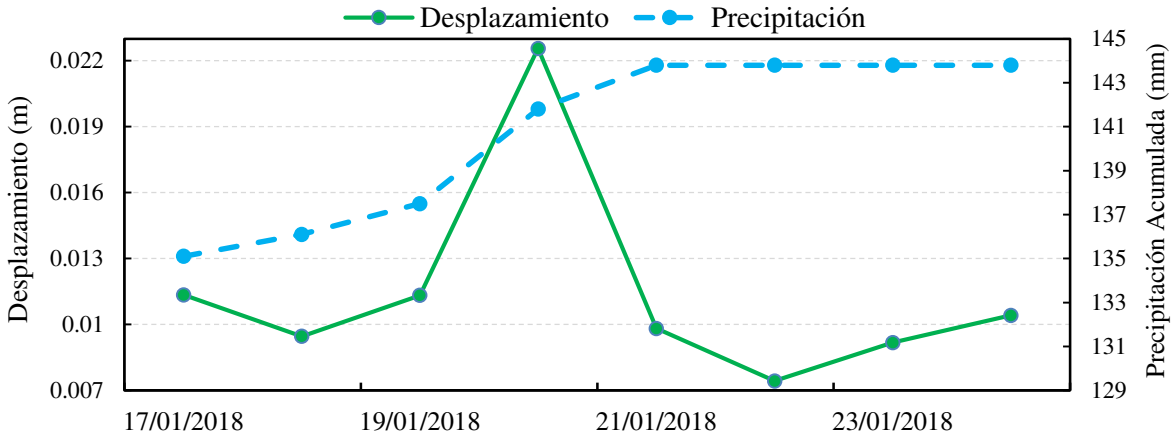


Figura 49. Sección de serie de tiempo de la estación PI04. Se muestra la evolución temporal de los desplazamientos estimados entre los días 17 y 24 de enero del 2018 y paralelamente las mediciones de precipitación acumulada en esos días. Las pendientes de ambas curvas se elevan desde el 19 al 20 de enero y corresponden a un aumento aproximado de 1.1 cm para curva verde (desplazamientos) y de 4.3 mm para la curva celeste (precipitación). Esta es una variación muy alta al resto, ya que los demás análisis muestran variaciones de muy bajas magnitudes (< 2 mm).

De acuerdo a los sismos determinados en el lapso de tiempo propuesto en esta sección, se analizó 35 de los 54 sismos (apéndice H), de los cuales se determinó que 12 causaron posibles desplazamientos cosísmicos. Esto se basó en que las diferentes estimaciones de desplazamientos en promedio oscilan entre 1 a 2 mm, por lo que las medidas mayores a estas cifras se consideraron como posibles desplazamientos cosísmicos respecto a cada sismo que se desencadeno en un día especifico. Estos eventos sísmicos se distribuyeron paralelamente con los datos de desplazamientos estimados (ver figura 50) por la estación PI04 para observar gráficamente la cuantificación exacta del cambio que existió en la zona de estudio al detonar cada sismo. Los puntos amarillos representan los sismos de magnitudes Mw de 5.0 y 5.5, el punto anaranjado al sismo Mw de 6.1, el punto rojo al sismo Mw de 8.0 y los puntos en verde oscuro a los sismos de magnitudes Mw entre 4.4 y 4.9.

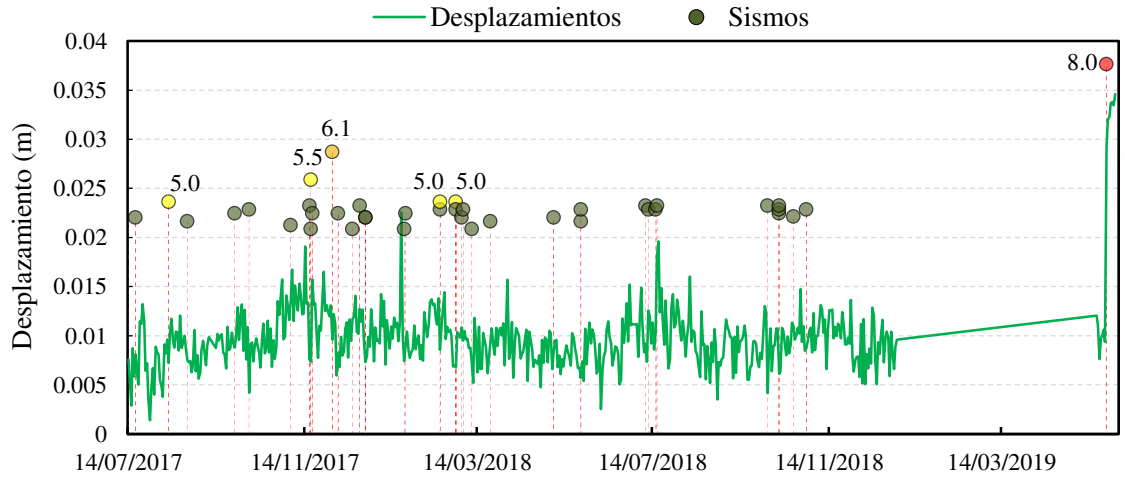


Figura 50. Distribución de sismos en la serie de tiempo de desplazamientos de la estación PI04.

De esta manera el sismo más significativo fue el que ocurrió el 26 de mayo, el cual provocó un elevado desplazamiento de 19 mm (ver figura 57), mientras que el resto de sismos provocaron desplazamientos con magnitudes inferiores (1 a 8 mm). Esto demuestra que a pesar de que el sismo de Mw de 8.0 estuvo a una distancia muy alejada de la zona de estudio, influyó en el avance de los desplazamientos ocurridos en la ciudad misma y sus alrededores.

A continuación, se presenta las series de tiempo correspondientes a los posibles desplazamientos cosísmicos asociados a 12 principales sismos determinados en la ventana temporal respecto a la estación PI04. Las líneas rojas de trazo presentes en cada gráfico, indican la fecha donde ocurrieron dichos sismos. Todos estos gráficos representan pequeñas secciones de forma ampliadas de la figura 50, de esta manera se aprecia de forma directa los posibles desplazamientos cosísmicos medidos en cada fecha.

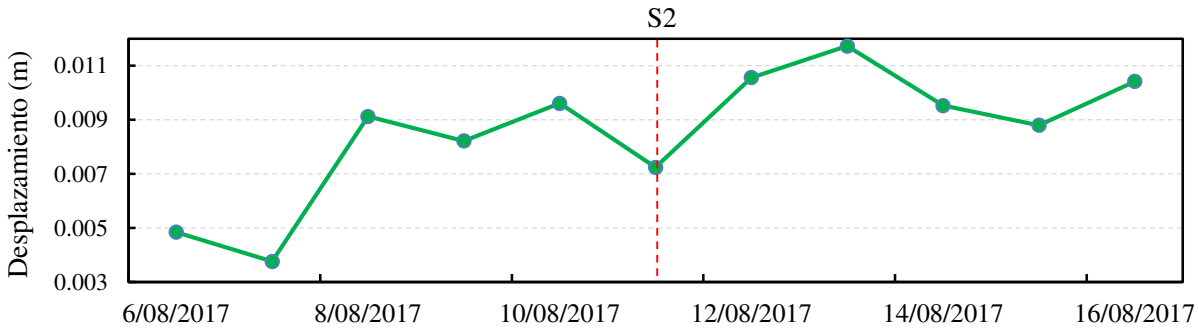


Figura 51. Sección de la serie de tiempo de la estación PI04 para el periodo del 14 al 24 de julio del 2017. La línea roja discontinua indica la fecha correspondiente al sismo de magnitud Mw de 5.0, ocurrido a 298 km de la zona de estudio y a una profundidad de 64 Km. Se observa un posible desplazamiento cosísmico de 3 mm, asociado al evento sísmico ocurrido el 11 de agosto del 2017.

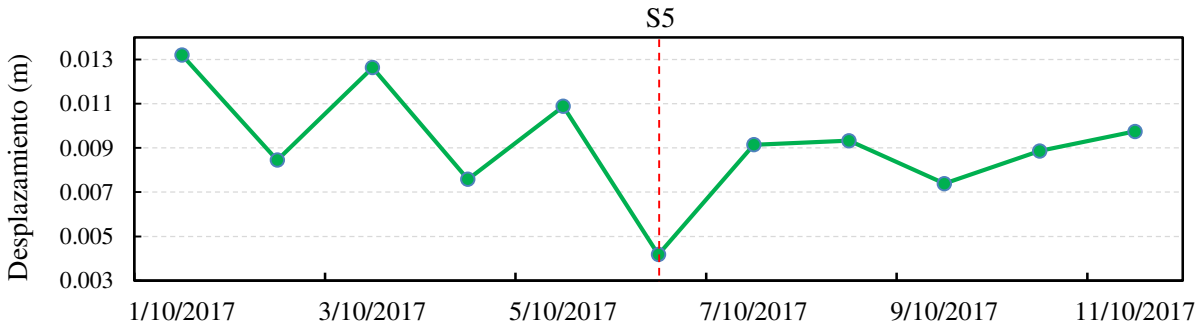


Figura 52. Sección de la serie de tiempo de la estación PI04 para el periodo del 1 al 11 de octubre del 2017. La línea roja discontinua indica la fecha correspondiente al sismo de magnitud Mw de 4.9, ocurrido a 181 km de la zona de estudio y a una profundidad de 35 Km. Se observa un posible desplazamiento cosísmico de 5 mm, asociado al evento sísmico ocurrido el 6 de octubre del 2017.

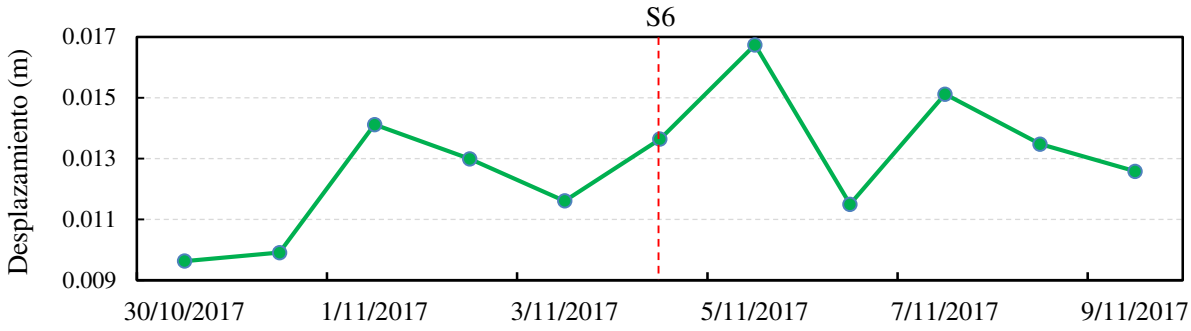


Figura 53. Sección de serie de tiempo de la estación PI04 para el periodo del 30 de octubre del 2017 al 9 de noviembre del 2017. La línea roja discontinua indica la fecha correspondiente al sismo de magnitud Mw de 4.5, ocurrido a 193 km de la zona de estudio y a una profundidad de 45 Km. Se observa un posible desplazamiento cosísmico de 3 mm, asociado al evento sísmico ocurrido el 4 de noviembre del 2017.

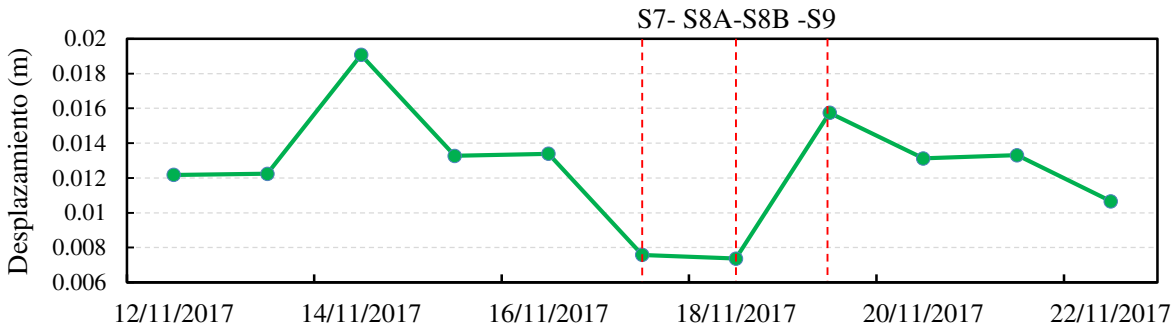


Figura 54. Sección de serie de tiempo de la estación PI04 del 12 al 22 de noviembre del 2017. Las líneas rojas discontinuas indican las fechas respectivas de los sismos de magnitudes Mw de 4.9 (S7), 5.5 (S8A), 4.4 (S8B) y 4.8 (S9), todos ocurridos a menos de 252 km de la zona de estudio. Se observa un posible desplazamiento cosísmico de 8 mm, asociado a los eventos sísmicos ocurridos el día 18 de noviembre del 2017. Mientras que S7 y S9 no generaron desplazamientos cosísmicos.

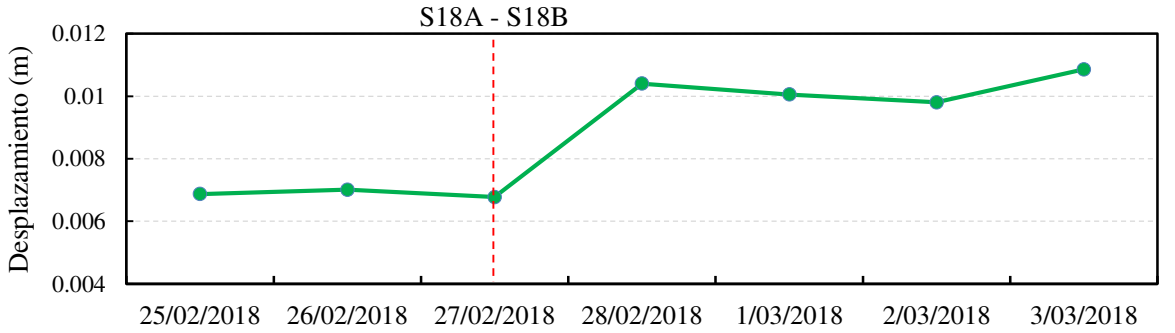


Figura 55. Sección de serie de tiempo de la estación PI04 del 25 de febrero del 2018 al 3 de marzo del 2018. La línea roja discontinua indica la fecha correspondiente a los dos sismos de magnitudes Mw de 4.9 (S18A) y 5.0 (S18B), a 261 Km y 270 Km, respectivamente de la zona de estudio. S18A se desencadeno a una profundidad de 3 Km, mientras que S18B a una profundidad de 10 Km. De acuerdo a la curva de color verde, se observa un posible desplazamiento cosísmico de 4 mm, asociado a los dos eventos sísmicos ocurridos el día 27 de febrero del 2018.

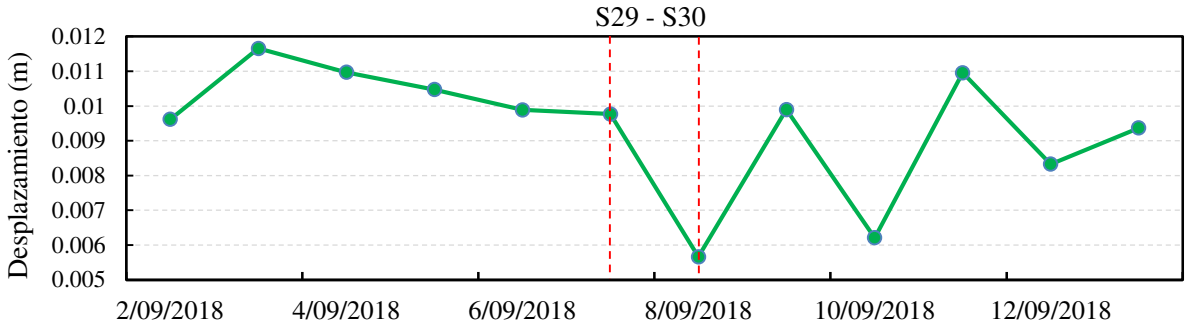


Figura 56. Sección de serie de tiempo de la estación PI04 del 2 al 13 de octubre del 2018. Las líneas rojas discontinuas indican las fechas respectivas de los sismos de magnitud Mw de 6.2 (S29) y Mw de 5.1 (S30). El sismo S29 se desencadeno a una profundidad de 110 Km, mientras que S30 a una profundidad de 10 Km y ambos a 330 Km y 248 Km respectivamente de la zona de estudio. Se observa un posible desplazamiento cosísmico de 4 mm solo por parte de S30.

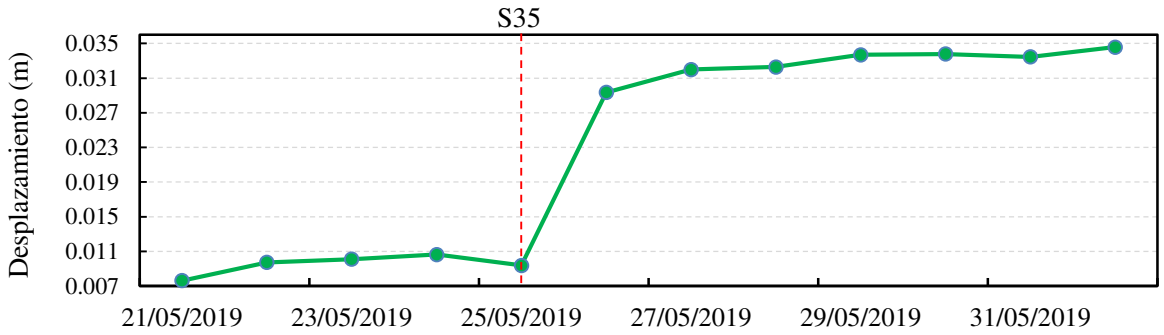


Figura 57. Sección de serie de tiempo de la estación PI04 del 21 al 26 de mayo del 2019. La línea roja discontinua indica la fecha cuando ocurrió el sismo de magnitud Mw de 8.0 (S35), el cual estuvo a una profundidad de 123 Km y a 470 Km de la zona de estudio. Se observa un posible desplazamiento cosísmico de 19 mm solo por parte de S35.

Capítulo 5

Análisis y discusión de resultados

5.1 Prueba NQ1

5.1.1 Campo Vectorial de desplazamientos y estimación de velocidades

En las secciones anteriores (4.4.1, 4.4.2 y 4.4.3) se analizaron las extensiones superficiales de las mayores deformaciones y sus respectivas magnitudes, pero aún no se ha detallado la dinámica y cinemática en general de estas zonas, como la dirección de propagación y las estimaciones de las velocidades de dichos desplazamientos con respecto al tiempo de estudio. Es por eso que, en este capítulo y sus posteriores secciones, se analiza a más profundidad estos conceptos y resultados para complementar la información sobre la caracterización de las zonas determinadas anteriormente dentro de las delimitaciones de la ciudad de Huancabamba y sus alrededores.

Recordar que las magnitudes de los desplazamientos son valores netos o acumulados en el determinado lapso de tiempo (719 días), esta característica permite la extracción directa de las velocidades de los desplazamientos, efectuando la división entre sus magnitudes y el tiempo total de estudio respecto a esta prueba. Los resultados son medidos en mm/s para determinar el tipo de velocidad que presenta el movimiento en masa detectado y también se mide en m/año, para analizar una mayor extensión temporal del avance de estos desplazamientos a largo plazo.

En la figura 58, se presentan la distribución de los campos vectoriales correspondiente a las zonas ZR1, ZR2 y ZR3, dentro del perímetro de la ciudad (línea de trazo roja) y fue determinado a través del software COSI-Corr. Los vectores muestran la orientación de propagación de los desplazamientos presentes dentro de dichas zonas, pero no representan en escala dichos desplazamientos, debido a esto se debe usar la barra de colores para interpretar la magnitud de dichos movimientos. Estos vectores tienen una dispersión general en dirección hacia el sureste (Cerro Colorado) y en casos específicos hacia quebradas y el rio Huancabamba, con velocidades desde $2.0x10^{-6}$ mm/s hasta $4.96x10^{-6}$ mm/s. Este rango dinámico se extiende

en casi todo el territorio delimitado por la línea perimetral de color rojo y según la clasificación de Varnes y Cruden (1996), nos permite identificar dichos desplazamientos como muy lentos (ver tabla 5).

Por otro lado, se identificó algunas zonas de baja velocidad con magnitudes menores a $2.0x10^{-6}$ mm/s, en regiones dentro y fuera del perímetro de la ciudad que en su mayoría presentan velocidades casi nulas, las cuales están representadas por el color celeste.

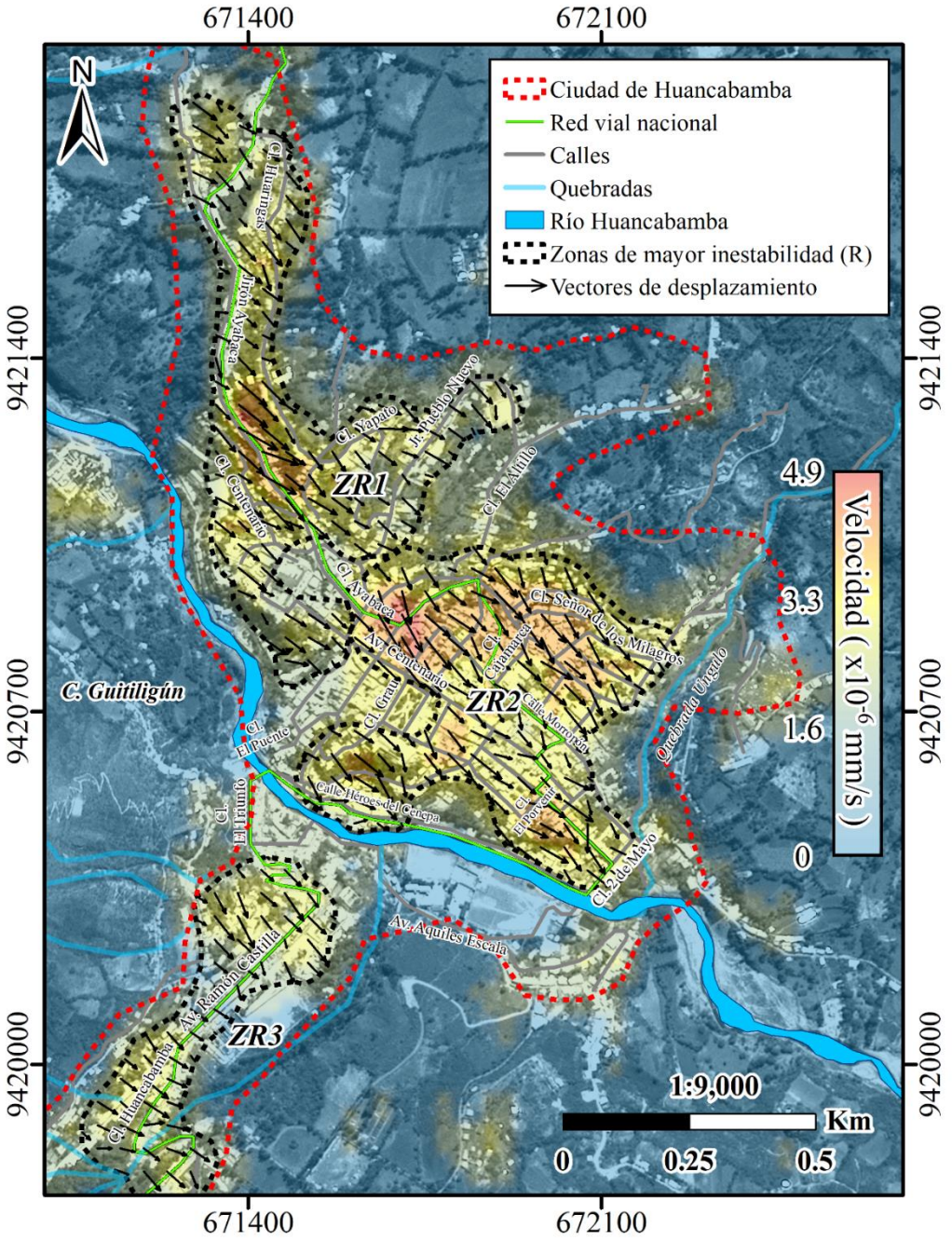


Figura 58. Mapa de distribución del campo vectorial y las magnitudes de velocidades estimadas en mm/s correspondientes a la prueba NQ1.

En la figura 59, se observa el mismo mapa de la figura 58 pero con la distribución de velocidades estimadas a largo plazo, específicamente en unidades de m/año. Nuevamente se recalca la marcada deformación superficial presente en la ciudad y que corresponde a medidas entre 0.09 m/año hasta 0.14 m/año, para zonas de color rojo.

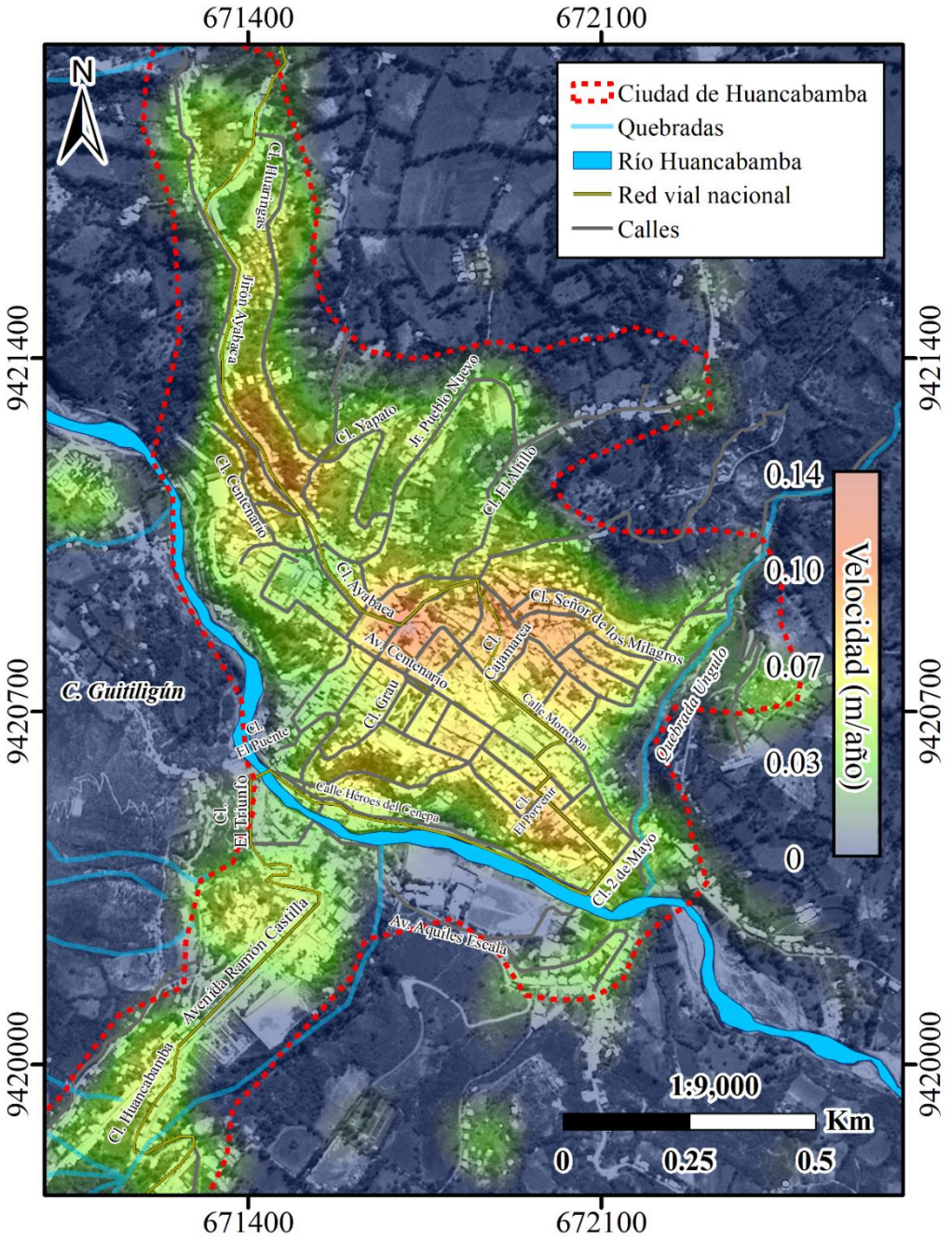


Figura 59. Distribución de velocidades a escala de m/año, correspondientes a la prueba NQ1.

A pesar que se ha analizado los resultados enfocándose en la ciudad misma, se puede notar que hay acumulaciones de pequeñas zonas externas al perímetro de la ciudad de Huancabamba, que

presentan desplazamientos de magnitudes que llegan hasta los 0.10 m. Esto evidencia que hay zonas de deformación superficial de gran extensión pero que no se han notado en estos resultados debido a la naturaleza de las características de imágenes usadas en esta prueba, particularmente en la baja resolución espacial. Como se discutió en la sección 4.1 del capítulo anterior, cada tipo de imagen satelital fue derivada para ciertas tipo de pruebas en base a sus características y a la efectividad de la correlación subpíxel para cada imagen.

5.1.2 Correlatividad de desplazamientos y pendientes

En esta sección se correlacionaron las direcciones de movimiento de los desplazamientos (magnitudes y vectores), con las características de las pendientes (grado y orientación) presentes en el área de estudio. De esta forma se analiza más a profundidad la naturaleza del desplazamiento y la dirección de movimiento de las deformaciones superficiales.

En la figura 60, se presenta las zonas ZR1, ZR2 y ZR3 con la distribución de los vectores de desplazamientos sobre pendientes con diferentes valores, donde las de mayor grado (regiones rojizas) se encuentran en la parte sur del jirón Ayabaca (~27°), al norte de la avenida Héroes del Cenepa (31°) y al término de la calle El Triunfo (~26°). Las tasas de menores grados de pendientes (2° hasta ~10°) se encuentran en el centro de la zona ZR2, desde la Cl. Ayabaca hasta la Cl. Morropón Cabe notar que en las zonas de mayor pendiente se puede observar que los vectores de desplazamiento esta dirigidos hacia el sur o sureste. Por otro lado, en la figura 61, se presenta las mismas zonas y sus vectores de desplazamientos, sobre un mapa con las orientaciones de las pendientes. De esta manera, en la parte norte de la zona ZR1, se encuentra regiones de color azul (247° - 292°) y celeste (247° - 292°), correspondiente a orientaciones hacia el oeste y suroeste, respectivamente. En estas regiones algunos de los vectores de desplazamientos van en dirección contraria y se dirigen mayoritariamente hacia el sureste. Mientras que en regiones al este de ZR1 (entre la Cl. Yapato y el Jr. Pueblo Nuevo) se observa áreas en color verde lima (112° - 157°) y amarillo (67° - 112°), correspondiente a orientaciones hacia el sureste y este, respectivamente.

Siguiendo con el análisis, se observa que la distribución de los vectores presentes en la zona ZR2, tienen una dispersión general en dirección hacia el este y sureste, lo cual concuerda con la orientación de pendiente de las zonas de color naranja y amarillo, pertenecientes a orientación noreste (337°-360°) y este (337°-360°), respectivamente. Mientras que en la zona ZR3, se observa la distribución de los vectores de desplazamientos sobre las pendientes con

orientaciones mayoritariamente hacia el este (regiones amarillas), a lo largo de la Av. Ramón Castilla y la Cl. Huancabamba. Solo existe tres regiones de color rojo, donde dos de ellas presentes en ZR2 y otra en ZR3, las cuales representan las pendientes con orientaciones hacia el norte y que notablemente los vectores de desplazamientos están en movimiento contrario a estas orientaciones.

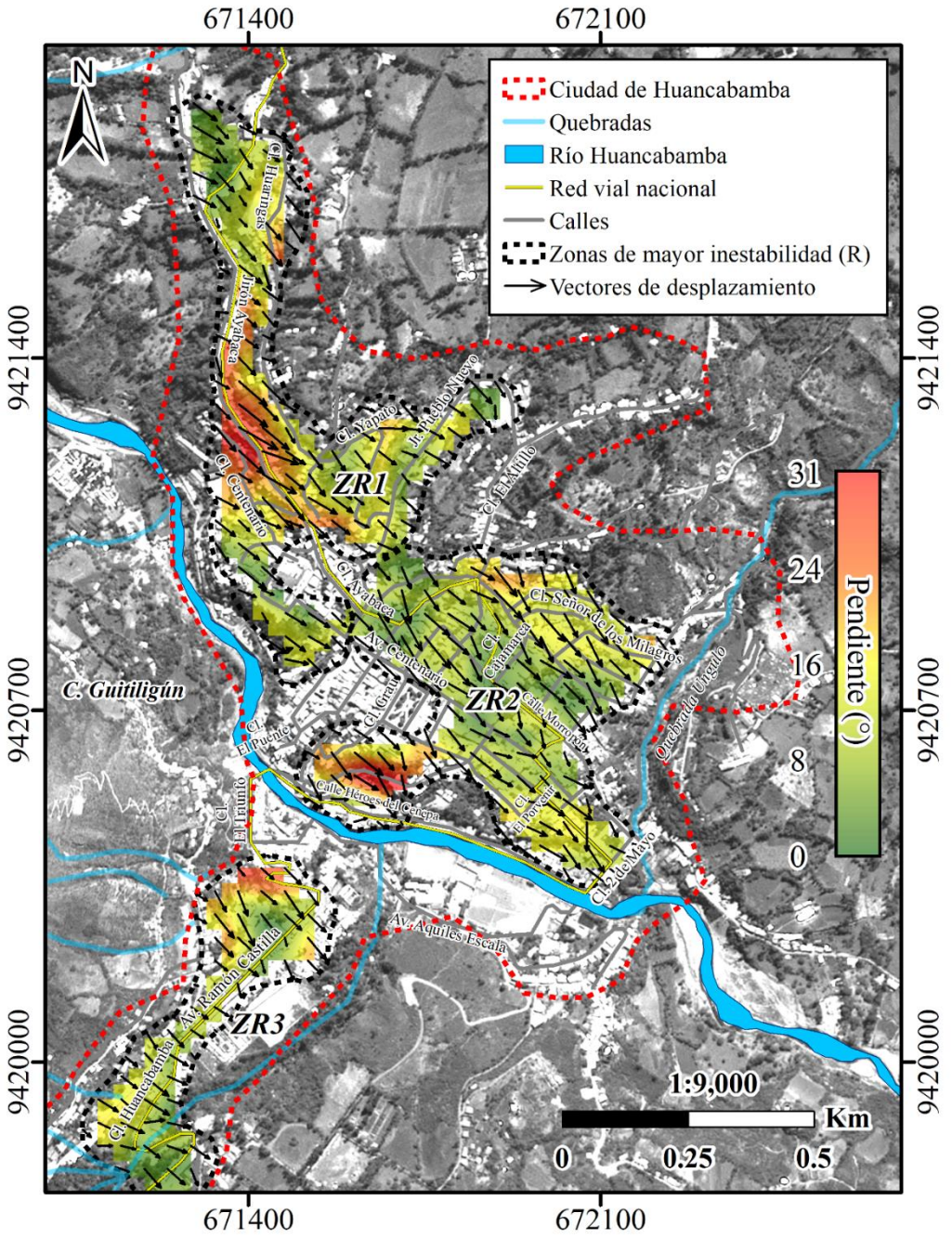


Figura 60. Distribución de campo vectorial sobre mapa con grados de pendientes, correspondientes a la prueba NQ1.

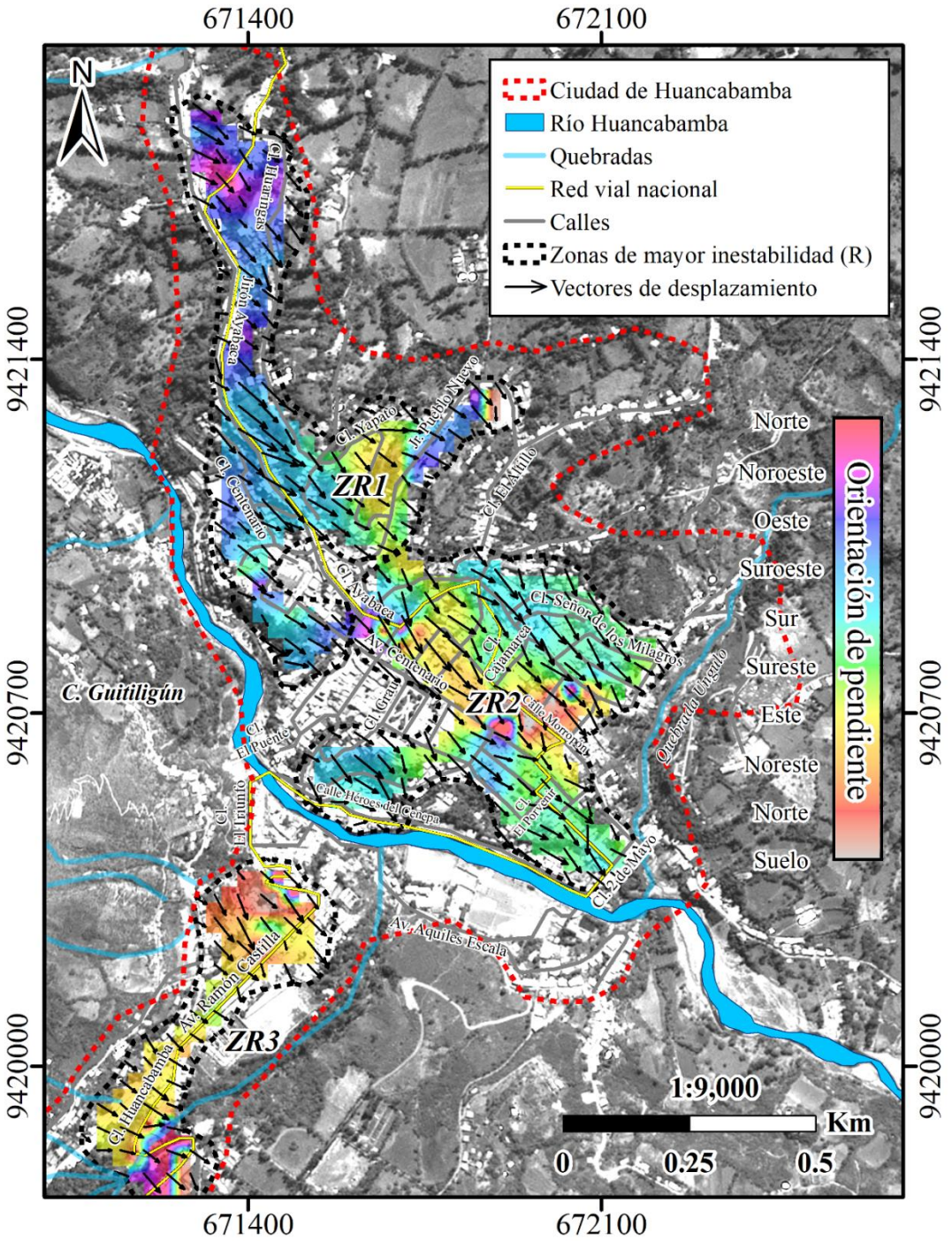


Figura 61. Distribución de campo vectorial sobre mapa con orientación de pendientes, correspondientes a la prueba NQ1.

5.2 Prueba NP12

5.2.1 Campo vectorial de desplazamientos y estimación de velocidades

Según lo analizado en las secciones anteriores (4.5.2, 4.5.3 y 4.5.4), se afirma que las deformaciones superficiales de mayores magnitudes y de grandes superficies, se encuentran

ubicadas externamente a la ciudad de Huancabamba, presentando desplazamientos mayores a 0.17 m. En esta sección se analiza de las características dinámicas de cada una de estas zonas y se describe la dirección de propagación de cada vector de desplazamiento, determinado en los 420 días correspondiente a la ventana temporal de la prueba NP12. Se asocia las pendientes del relieve terrestre, sus orientaciones y las estimaciones de velocidades estimadas. De esta manera se completa la información de la caracterización de cada campo vectorial perteneciente a cada zona y en particular se verifica la concordancia de la dirección de los vectores de desplazamientos con las orientaciones de las pendientes.

En la figura 62 se muestra la distribución de los campos vectoriales de los desplazamientos resultantes de las 13 principales zonas con mayor deformación superficial, las cuales están sobre la interpolación de las velocidades en unidades de $x10^{-5}$ mm/s. De esta manera se clasificó el tipo de movimiento en masa, según la velocidad en que se propagó. Recordar que las dos primeras zonas (VF1 y VF2) no se analizan debido a la presencia de falsos desplazamientos (ver sección 4.5.1). Esto también se comprueba analizando de forma rápida las orientaciones de las pendientes con las direcciones de propagación de cada vector del campo vectorial de desplazamiento, ya que, en estos dos casos, las direcciones de propagación de cada vector van en contra de la orientación natural de las pendientes.

De forma general se obtuvieron velocidades de desplazamiento, entre $0.3x10^{-5}$ mm/s hasta $2.8x10^{-5}$ mm/s, demostrando que la mayoría de las zonas de mayor deformación superficial, presentan movimientos de masa del tipo muy lento, según la clasificación por velocidades, propuesta por Varnes y Cruden (1996). Esto también evidencia la similitud del tipo de velocidad que presenta los movimientos en masa dentro de la ciudad de Huancabamba, los cuales se describieron en las secciones anteriores y demostrando que son del mismo tipo que las encontradas en esta sección.

Como esta prueba comprende solo la ventana temporal de 1 año, 1 mes y 23 días, entonces el análisis de las velocidades en unidades de m/año no cubre el tiempo en secciones, es por esto que también se realizó un mapa de velocidades de desplazamiento con unidades de m/mes (ver figura 63) para así cubrir partes de todo el tiempo de estudio correspondiente a la prueba NP12.

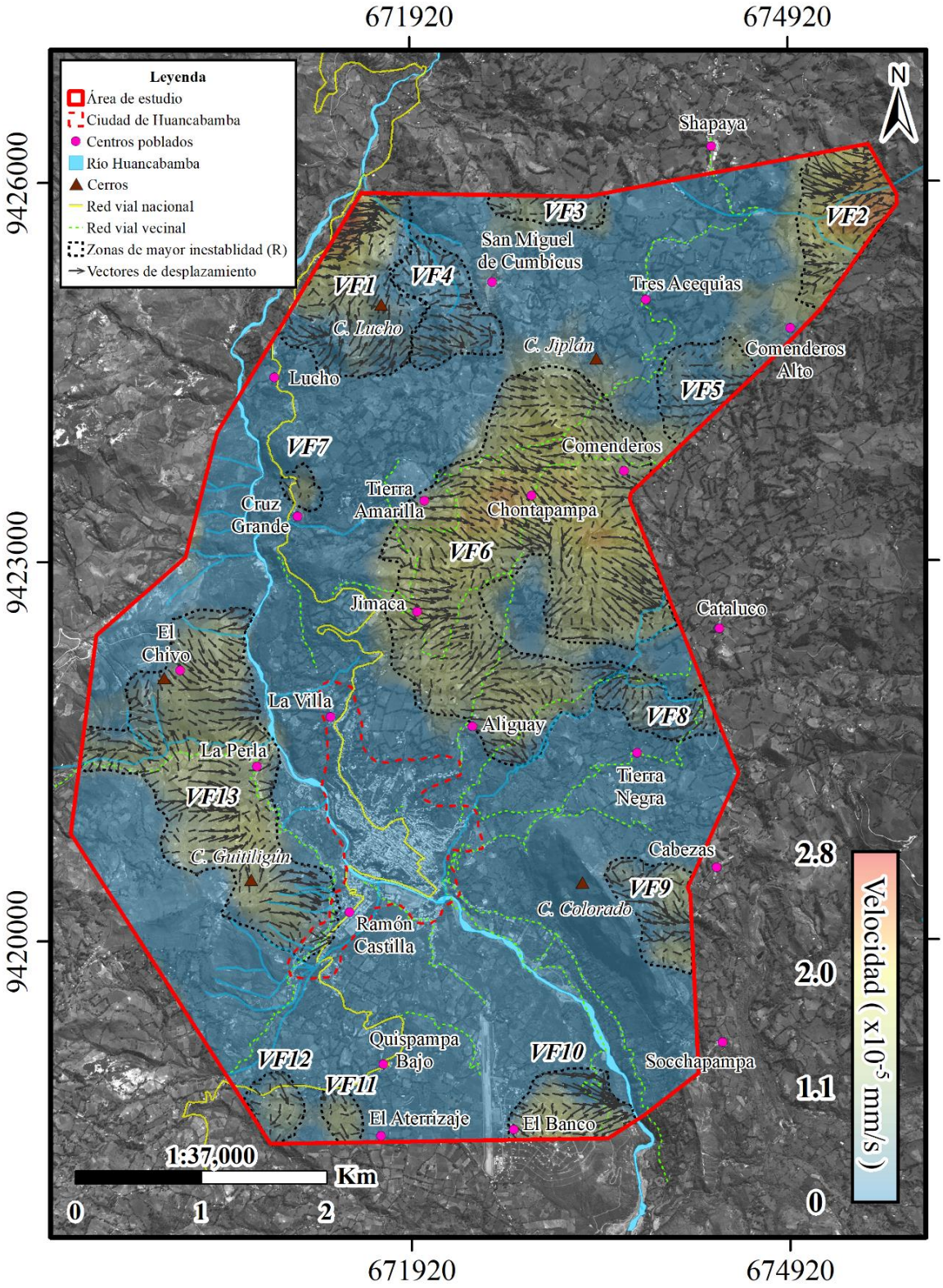


Figura 62. Mapa de distribución general de los campos vectoriales de desplazamiento y las magnitudes de velocidades en unidades de $x10^{-5}$ mm/s, en las 13 zonas de mayor deformación superficial, correspondientes a la prueba NP12.

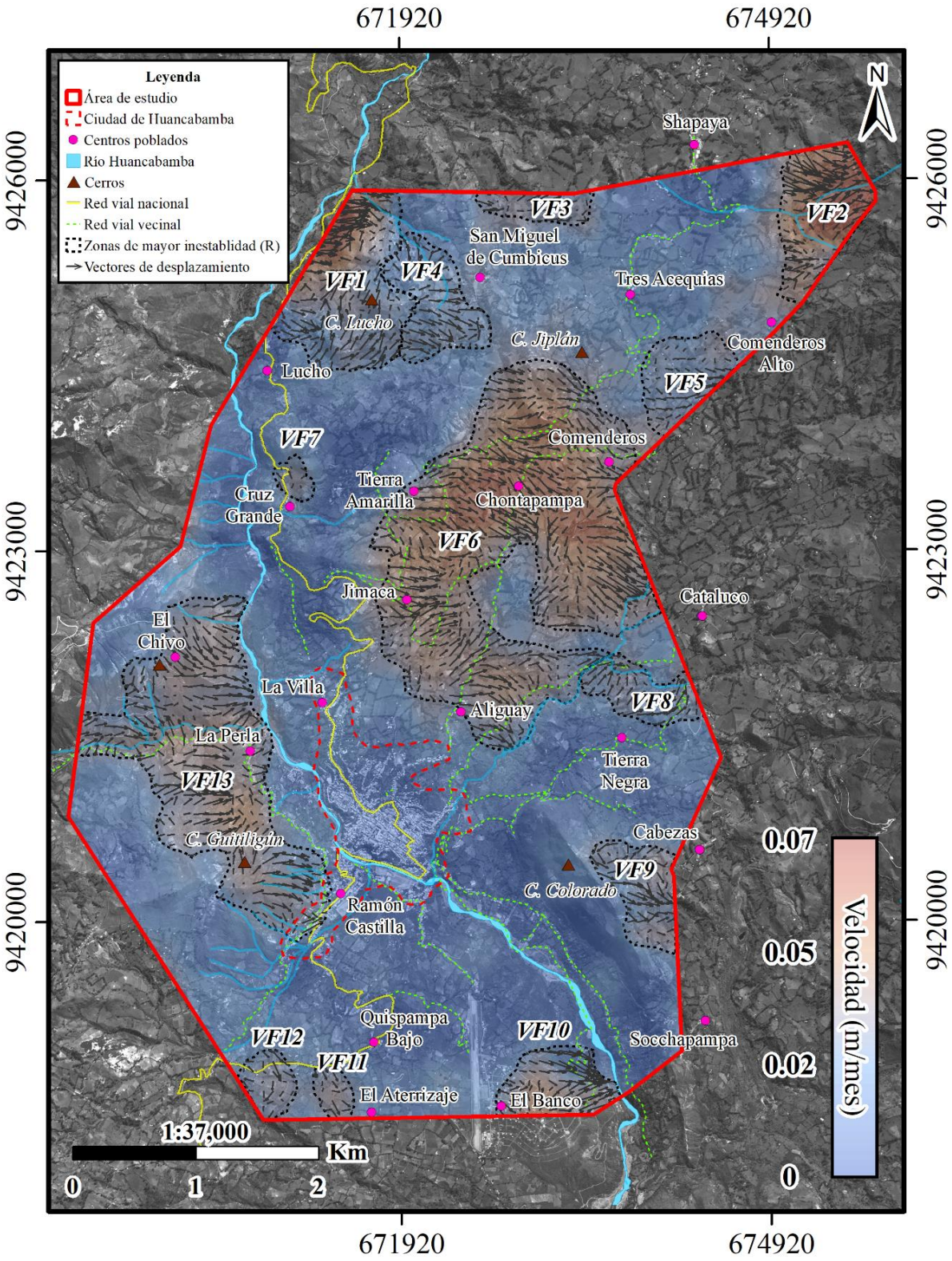


Figura 63. Mapa de distribución general de los campos vectoriales de desplazamientos y las magnitudes de velocidades en unidades de m/mes, en las 13 zonas determinadas de mayor deformación superficial, correspondientes a la prueba NP12.

5.2.2 Correlatividad de desplazamientos y pendientes

5.2.2.1 Zona VF3

En la figura 64 se presenta la vista panorámica de la zona VF3, en donde se observa la distribución de los vectores de desplazamiento en el relieve de dicha zona, delimitado por el polígono en verde. Por otro lado, en la figura 65 se presenta el campo vectorial de los desplazamientos resultantes determinados en la zona VF3, distribuidos sobre tres mapas: Orientación de pendientes, grado de pendientes y velocidades de los desplazamientos resultantes. Los vectores presentes en la figura 65a se muestra que la dirección de propagación de los desplazamientos dentro del perímetro punteado de color rojo, tienen una dispersión general en dirección hacia el norte y noreste, lo cual concuerda con la orientación de pendiente de las zonas de color rosa y roja, pertenecientes a orientación norte (337°-360°). Mientras que en la figura 65b, se observa la distribución de los vectores de desplazamientos sobre las pendientes con valores desde 4° hasta mayores a 27° y con velocidades mayores a $0.9x10^{-5}$ mm/s, como se observa en la figura 65c. Este rango dinámico se extiende en casi todo el territorio delimitado por la línea perimetral de color rojo y según la clasificación de Varnes y Cruden (1996), permite identificar dichos desplazamientos como muy lentos (ver tabla 5).

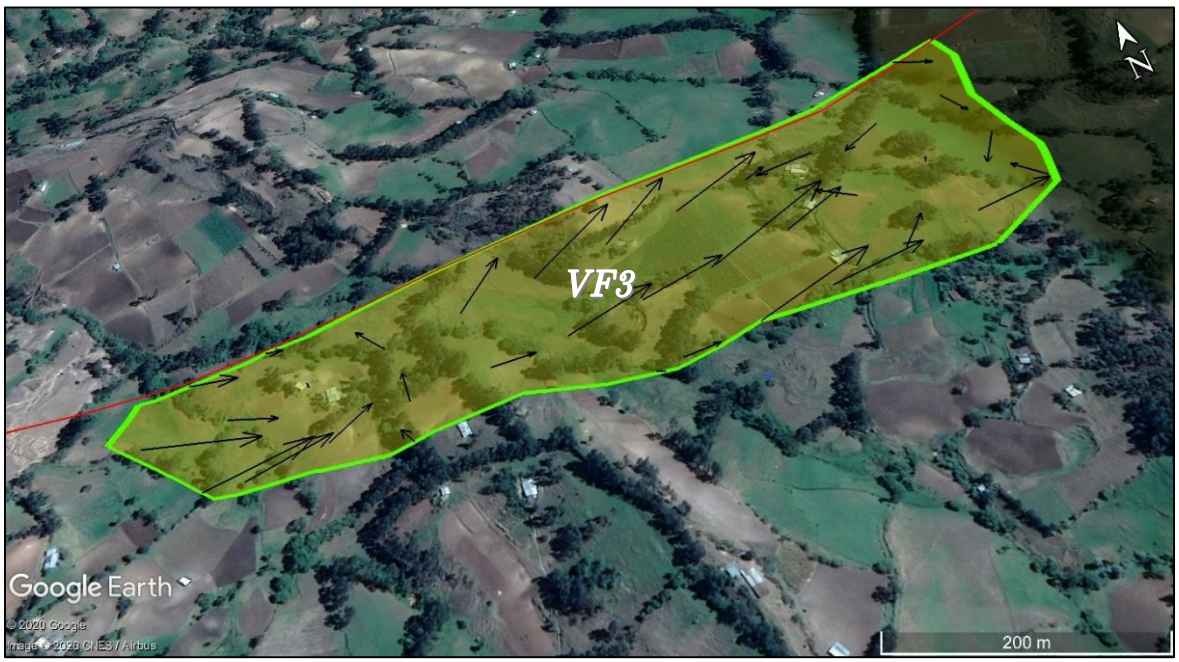


Figura 64. Vista panorámica del campo vectorial de los desplazamientos resultantes en el relieve de la zona VF3 (polígono verde). Hay una notable tendencia de dirección de los vectores de desplazamiento hacia el noreste. La línea roja representa el polígono del área total de estudio. Fuente: Google Earth.

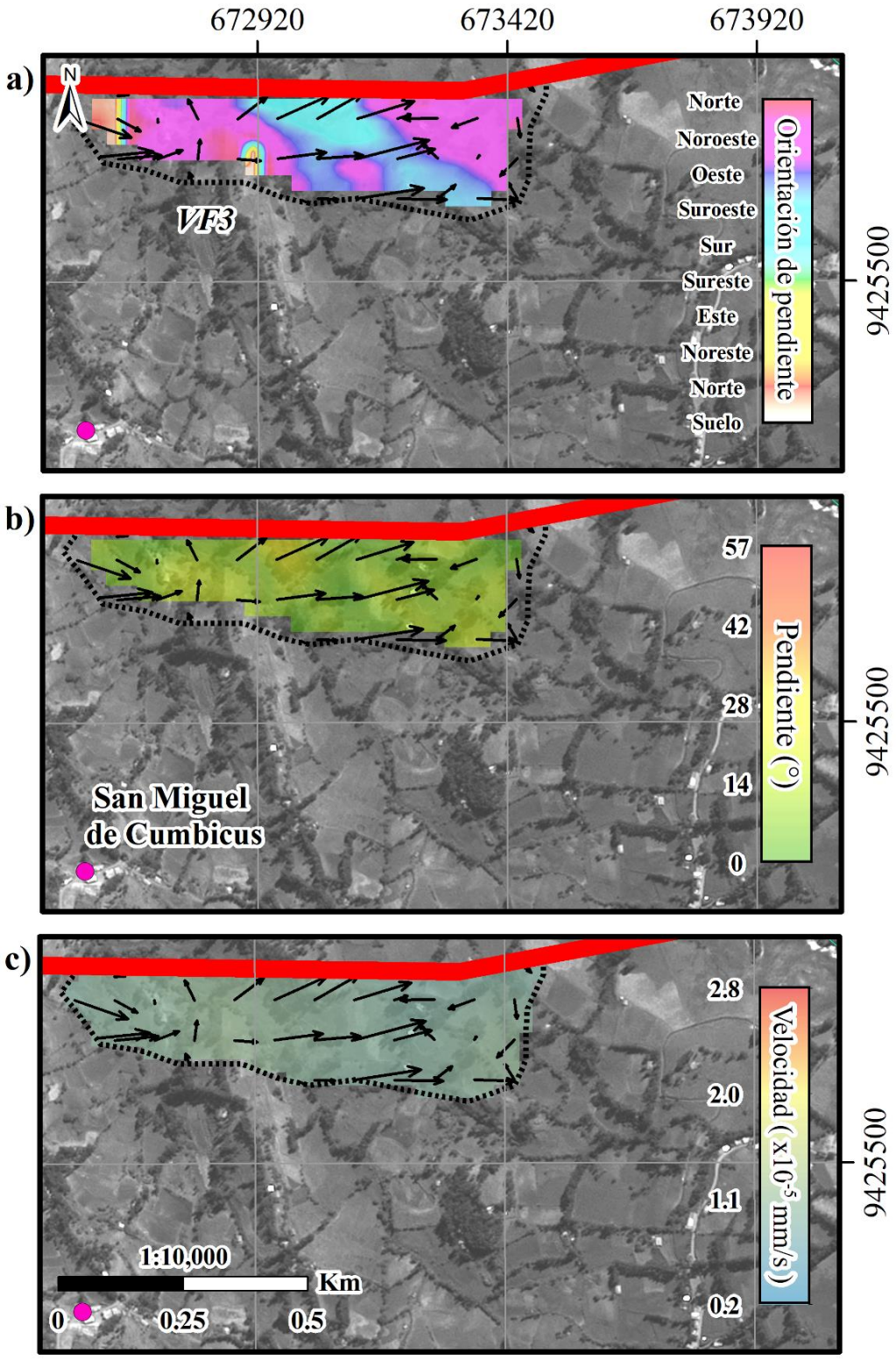


Figura 65. Distribución de los vectores de desplazamientos resultantes de la zona VF3, sobre secciones de mapas con a) orientaciones de pendientes, b) grado de pendientes y c) estimaciones de las velocidades de desplazamientos.

5.2.2.2 Zona VF4

En la figura 66, se presenta la vista panorámica de la zona VF4, la cual presenta la distribución de los vectores de desplazamiento en todo su relieve y delimitado por el polígono verde. Luego, en la figura 67 se observa el campo vectorial de los desplazamientos resultantes determinados en la zona VF3, distribuidos sobre los mapas de orientación de pendientes, grado de pendientes y velocidades de desplazamientos. Por otro parte, en la figura 67a, se muestran la dirección de propagación de los vectores de desplazamientos dentro del perímetro punteado de color rojo, tienen una dispersión en dirección hacia el norte (337°-360°), noreste (22°-67°) y este (67°-112°), concordando con la orientación de pendientes presentes en dichas zonas. Mientras que los vectores presentes en la zona VF1 se propagan en contra de la orientación presente en dicha zona, significando una notable incongruencia. En la figura 67b, se observa la distribución de los vectores de desplazamientos, sobre las pendientes con valores de 2° hasta mayores a 32° y con presencia de velocidades de $0.5x10^{-5}$ mm/s a $0.9x10^{-5}$ mm/s, como se observa en la figura 67c. Según la clasificación respecto a la velocidad de propagación de los movimientos de masa de Cruden y Varnes (1996), los desplazamientos identificados en VF4 son del tipo muy lentos (ver tabla 5).

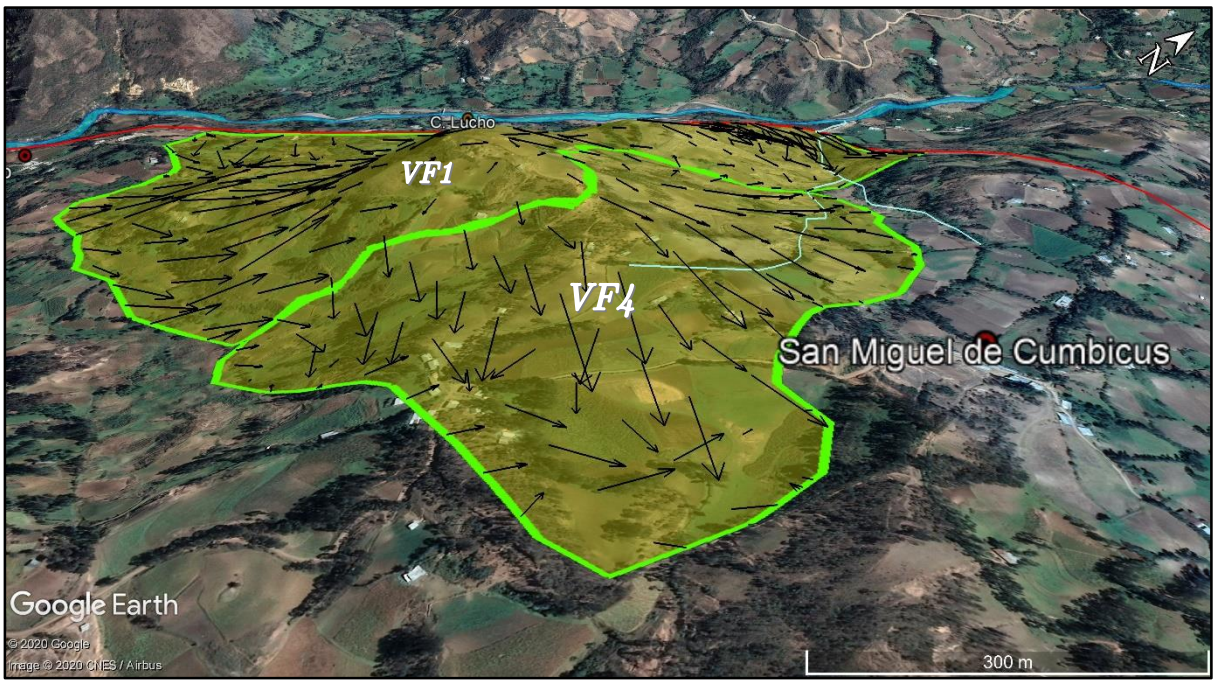


Figura 66. Vista panorámica del campo vectorial de los desplazamientos resultantes en el relieve de la zona VF4 y parte de VF1 (polígono verde). Hay una notable tendencia de dirección de los vectores de desplazamiento hacia el este y noreste. La línea roja representa el polígono del área total de estudio. Fuente: Google Earth.

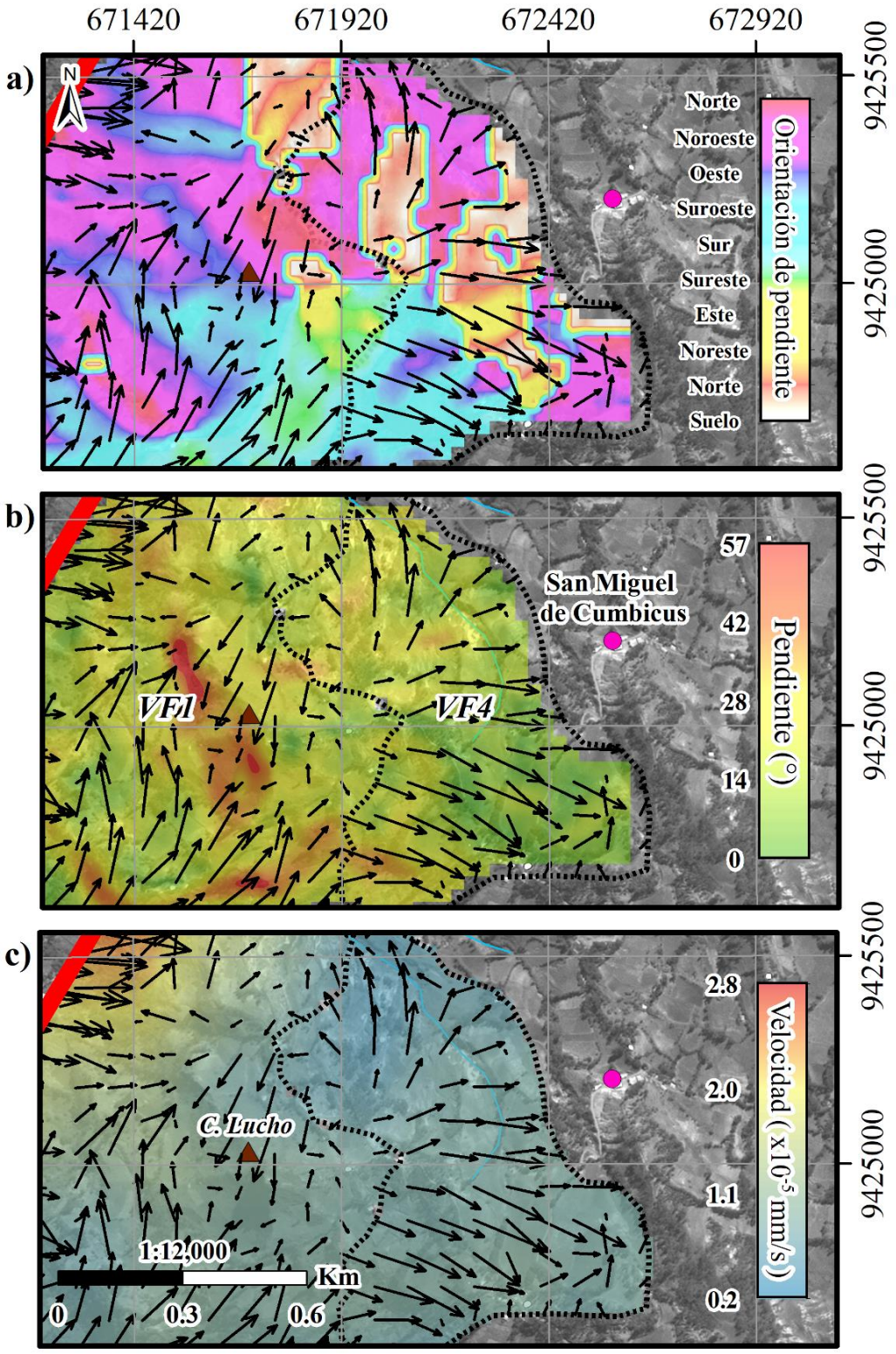


Figura 67. Distribución de los vectores de desplazamientos resultantes de la zona VF4, sobre secciones de mapas de a) orientación de pendientes, b) grado de pendientes y c) estimaciones de las velocidades de desplazamientos.

5.2.2.3 Zona VF5

La distribución de los vectores de desplazamientos en el relieve de la zona VF5 se observa en la figura 68, mientras que en la figura 69a, se presenta la distribución de estos mismos vectores sobre un mapa con las orientaciones de las pendientes presentes en el relieve de dicha zona. Cabe recalcar que se observa una notable incoherencia entre los vectores presentes en las regiones de color celeste (orientadas hacia el sur o sureste), ya dichos vectores de desplazamientos están dirigidos mayoritariamente hacia el este, lo cual es incongruente con las orientaciones de aquellas pendientes. A pesar que se eligió esta zona por presentar mayor deformación superficial, es probable que estas incoherencias encontradas sean debido a lo cerca que se encuentra con las regiones de sombras y nubes especificadas en la sección 4.5.1, similar a lo visto en la zona VF4, que colinda con VF1. Por otro lado, en la figura 69b se observa la disposición de los vectores de desplazamiento sobre la distribución de las pendientes del relieve con valores desde 2° hasta mayores a 28° y en la figura 69c se muestra nuevamente los vectores de desplazamientos resultantes, distribuidos en el campo de velocidades de dicha zona, abarcando un rango con magnitudes entre $0.9x10^{-5}$ mm/s y $1.2x10^{-5}$ mm/s.

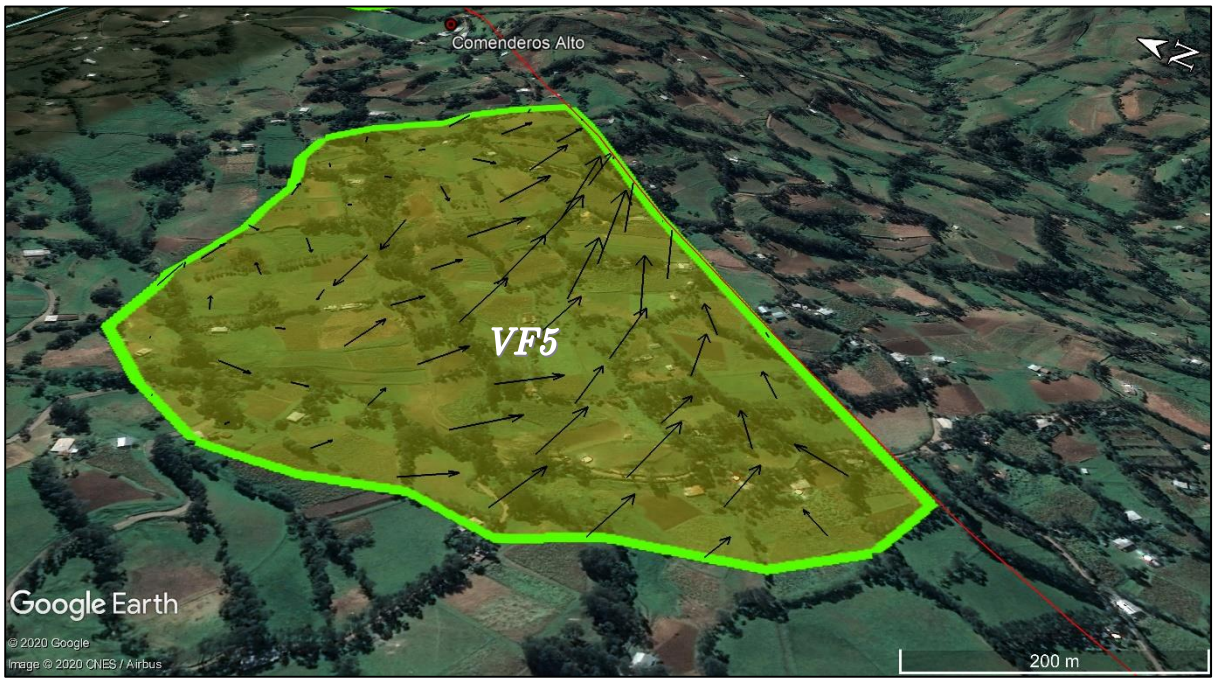


Figura 68. Vista panorámica del campo vectorial de los desplazamientos resultantes en el relieve de la zona VF5 (polígono verde). Hay una notable tendencia de dirección de los vectores de desplazamiento hacia el este y noreste. La línea roja representa el polígono del área total de estudio. Fuente: Google Earth.

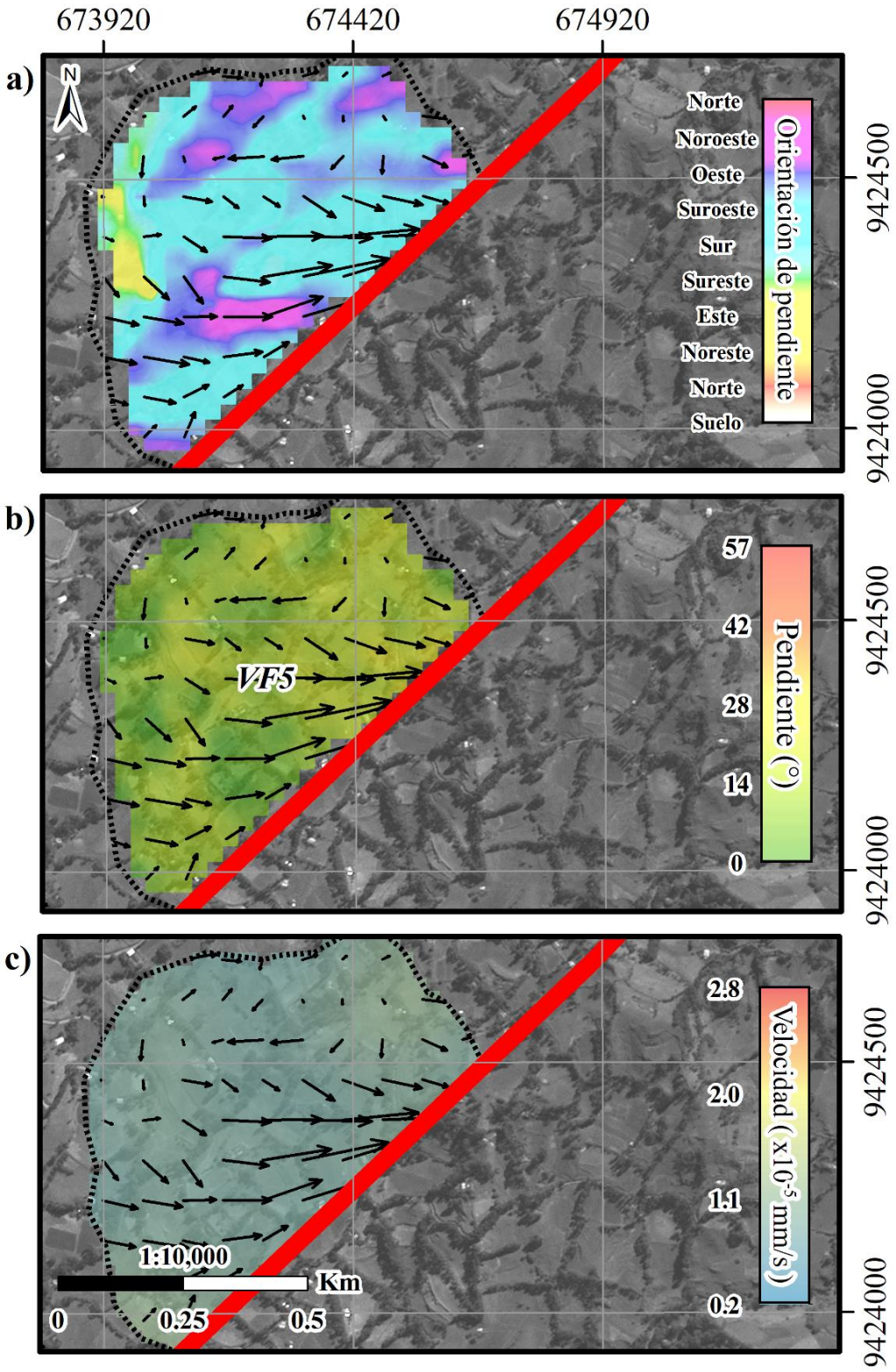


Figura 69. Distribución de los vectores de desplazamientos resultantes presentes en la zona VF5, sobre secciones de mapas de a) orientación de pendientes, b) grado de pendientes y c) estimaciones de las velocidades de desplazamientos.

5.2.2.4 Zona VF6 y zona VF8

En la figura 70, se presenta la vista panorámica del relieve de las zonas VF6 y VF8, en la cual están distribuidos los vectores de desplazamiento de cada zona, delimitadas por los polígonos en verde. De forma general, la zona sur de la región VF6 se dirige hacia la quebrada Ungulo, mientras que VF8 se dirige hacia la quebrada Cojunda. La línea de color rojo representa parte de los límites del área total de estudio. Se destaca también la región presente en medio de la zona VF6, la cual cuenta con elevaciones (>2230 m.s.n.m) superiores a las regiones a sus alrededores causando esa tendencia de bordeo y no de superposición. Mediante el análisis de correlación vectorial de desplazamientos resultantes y orientación de pendientes, en la figura 71 se observa la distribución de los campos vectoriales de las zonas VF6 y VF8, sobre un mapa con las orientaciones de las pendientes presentes. En la zona VF6 se determinaron regiones en donde los vectores se dirigen mayoritariamente hacia el noreste (22°-67°), este (67°-112°) y otros hacia el sureste (112°-157°), principalmente orientados hacia la quebrada Ungulo y su prolongación noreste. Mientras que en la zona VF8, los vectores de desplazamiento, en general, están orientados hacia direcciones hacia el noroeste (292°-337°) y norte (337°-360°), en dirección hacia la quebrada Cojunda.

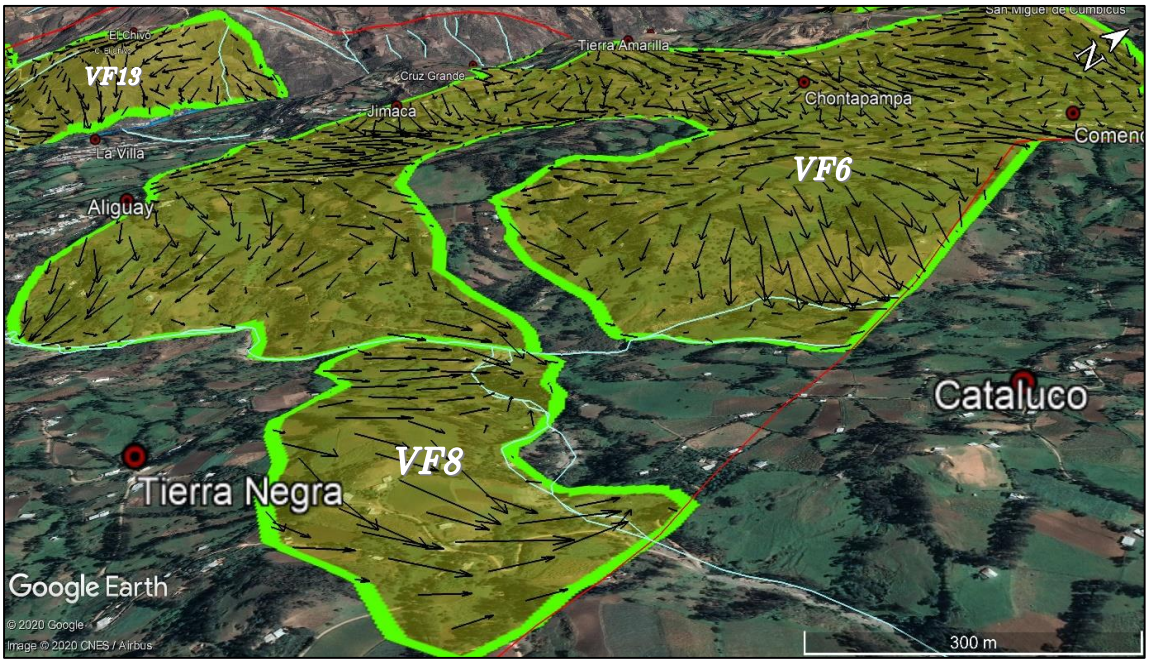


Figura 70. Vista panorámica del campo vectorial de los desplazamientos resultantes en el relieve de las zonas VF6 y VF8 (polígonos verdes). Hay una notable tendencia de dirección de los vectores de desplazamiento hacia el este y noreste, en dirección de las quebradas Ungulo y Cojunda. La línea roja representa el polígono del área total de estudio. Fuente: Google Earth.

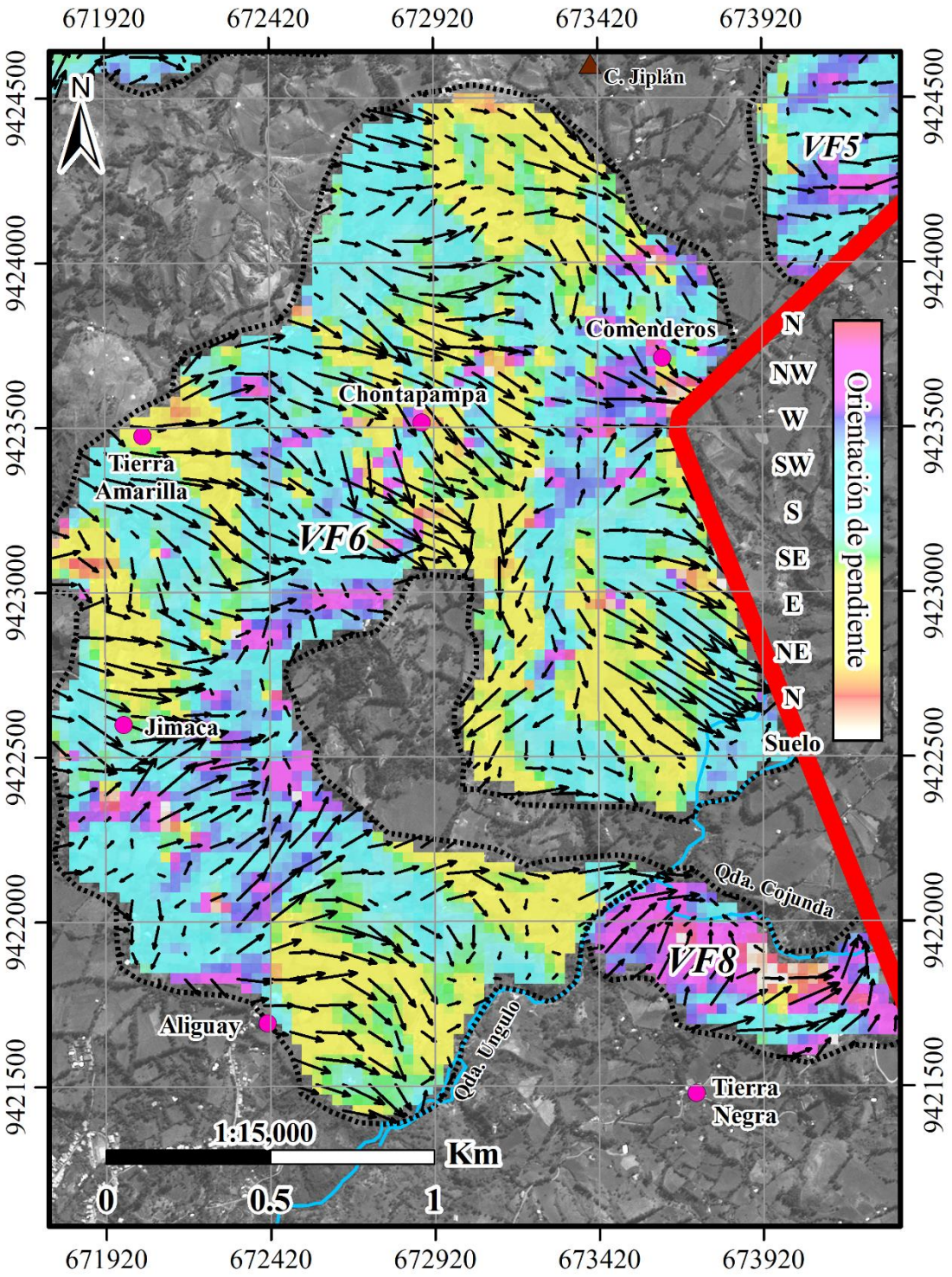


Figura 71. Distribución de los vectores de desplazamientos resultantes de las zonas VF6 y VF8, sobre un mapa de orientación de pendientes. Las quebradas Ungulo y Cojunda, son regiones de inflexión para dichos vectores. Mientras que la región central de zona VF6 y bordeada por esta misma, no presenta notables deformaciones superficiales debido a las grandes elevaciones del relieve presente (>2230 m.s.n.m).

En la figura 72, la zona VF6 presenta la distribución de los vectores de desplazamientos sobre las pendientes con valores desde 4° hasta mayores a 34°, donde las pendientes de mayor grado (regiones rojizas) se encuentran cerca a la quebrada Ungulo y al norte del centro poblado Chontapampa. Los grados de pendientes determinados en la zona VF8 oscilan entre 2° hasta mayores a 27°, donde los mayores grados se encuentran al este de la quebrada Cojunda. Cabe recalcar que en las regiones donde se concentre mayores vectores de desplazamiento, indicará que las magnitudes de desplazamiento resultantes en dichas regiones serán muy elevadas y representan las zonas de mayor deformación superficial.

Por otro lado, en la figura 73 se observa la disposición de los vectores de desplazamiento sobre el campo de velocidades para ambas zonas. De acuerdo a lo estimado en la zona VF6, se encontraron magnitudes de velocidades entre $0.9x10^{-5}$ mm/s y $2.3x10^{-5}$ mm/s, en donde la región entre los centros poblados de Tierra Amarilla y Chontapampa evidencian el desarrollo de desplazamientos con altas velocidades (>$1.9x10^{-5}$ mm/s) respecto al tiempo de 420 días. En el caso de la zona VF8, se estimaron magnitudes de velocidades entre $0.9x10^{-5}$ mm/s a $1.1x10^{-5}$ mm/s y las altas magnitudes se encontraron muy cerca a la quebrada Cojunda, lo cual podría significar que el transcurso de agua por el cauce de dicha quebrada estaría fuertemente influyendo en el aumento de la velocidad de los desplazamientos por dicha zona.

Recapitulando lo analizado en esta sección, se puede afirmar que las mayores regiones que concentran grandes magnitudes de desplazamiento están fuertemente conectadas con el grado de pendiente y la orientación de estas mismas, mientras que las velocidades de desplazamiento muchas veces depende de la ubicación de las zonas analizadas y el tipo de suelo presente. De esta manera la quebrada Ungulo y Cojunda son regiones geográficas importantes en donde la mayoría de desplazamientos determinados cercanos a estas quebradas, tienden a propagarse.

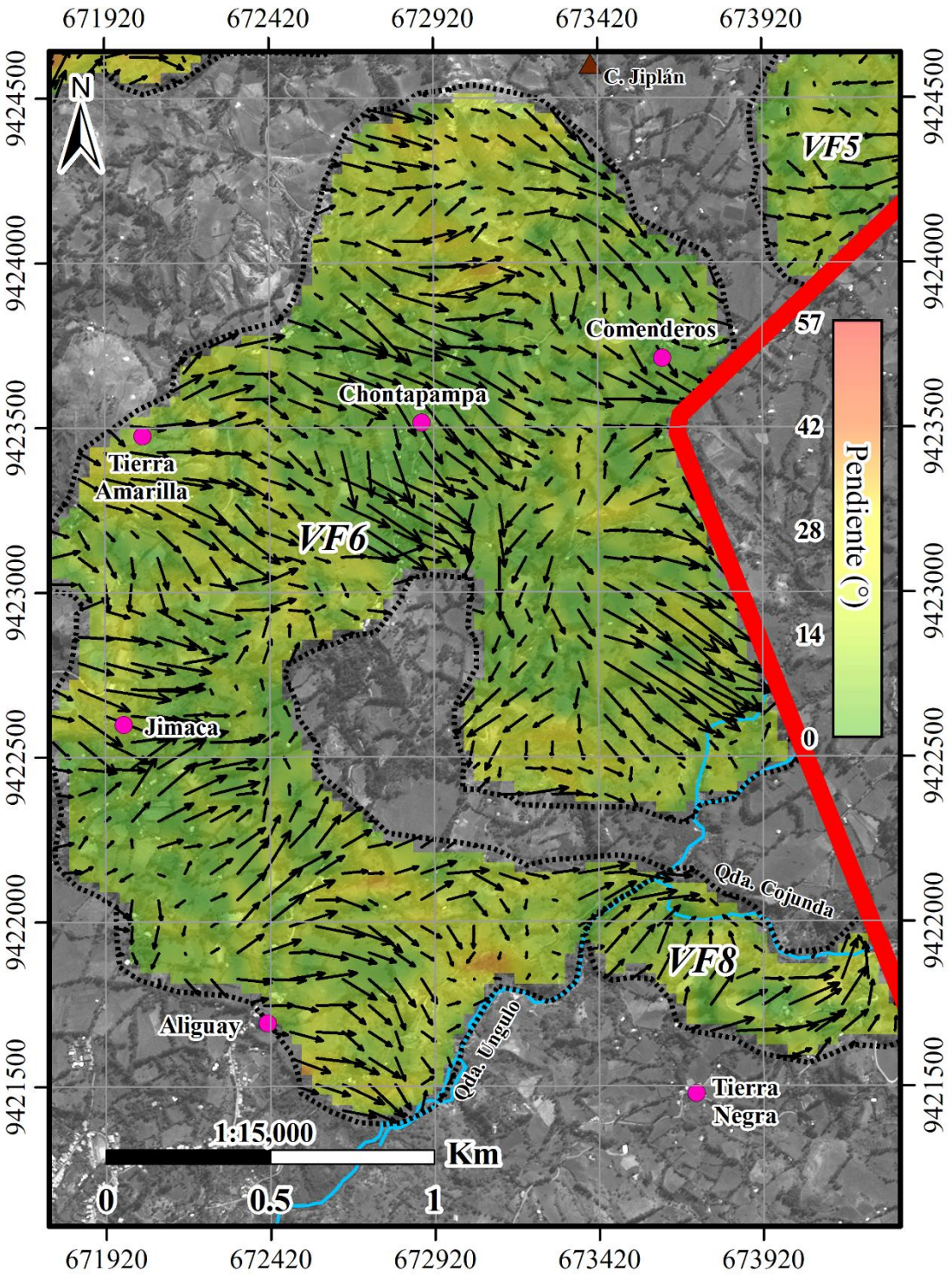


Figura 72. Distribución de los vectores de desplazamientos resultantes presentes en la zona VF6 y VF8, sobre mapa de grado de pendientes. A pesar que los relieves con grandes elevaciones están ubicados en la parte central de la zona VF6, estos no presentan pendientes de mayor grado, sino que al contrario son muy bajas y las de mayor grado están ubicadas cerca a la quebrada Ungulo.

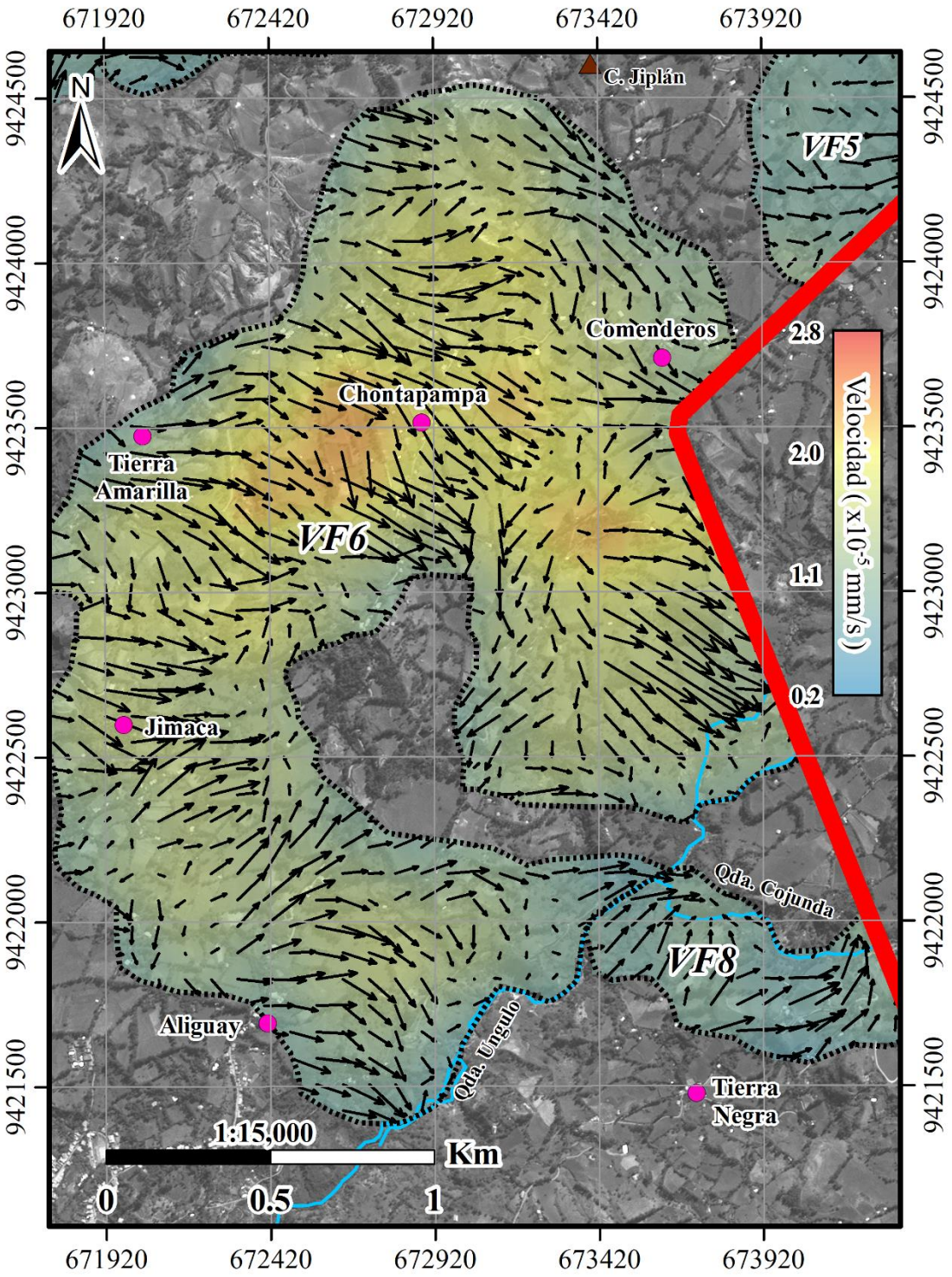


Figura 73. Mapa de distribución de los vectores de desplazamientos resultantes de la zona VF6 y VF8, sobre la disposición de las velocidades de desplazamientos respecto al tiempo de 420 días. Se aprecia una notable relación entre elevación y estimación de velocidades, ya que dentro de la zona VF6 se encuentran zonas de grandes elevaciones (>2200 m.s.n.m) donde también se estimaron velocidades de grandes magnitudes (>2.0x10^{-5} mm/s)

5.2.2.5 Zona VF7

En la figura 74, se presenta la vista panorámica del relieve de la zona VF7, en la cual se observa la distribución de los vectores de desplazamiento sobre dicha zona y delimitada por el polígono en verde. Luego, en la figura 75a, se observa la distribución de los vectores de desplazamientos resultantes sobre un mapa de las orientaciones de las pendientes presentes en dicha zona. Gracias al análisis realizado a cada zona, se determinó que la zona VF7 también presenta notables incoherencia entre las direcciones de propagación de los vectores de desplazamientos y las orientaciones de las pendientes en dicha zona. La mayoría de las pendientes están orientadas hacia el sur o sureste, mientras que los vectores de desplazamientos están dirigidos mayoritariamente hacia el norte o noroeste. Luego en la figura 75b, se observa la disposición de los vectores de desplazamiento sobre la distribución de los valores de las pendientes en el relieve presente de VF7. Está presenta valores desde 12° hasta mayores a 45° y en la figura 75c, se muestra nuevamente los vectores de desplazamientos, distribuidos en el campo de velocidades de dicha zona, y abarca un rango con magnitudes entre $0.8x10^{-5}$ mm/s y $1.2x10^{-5}$ mm/s.

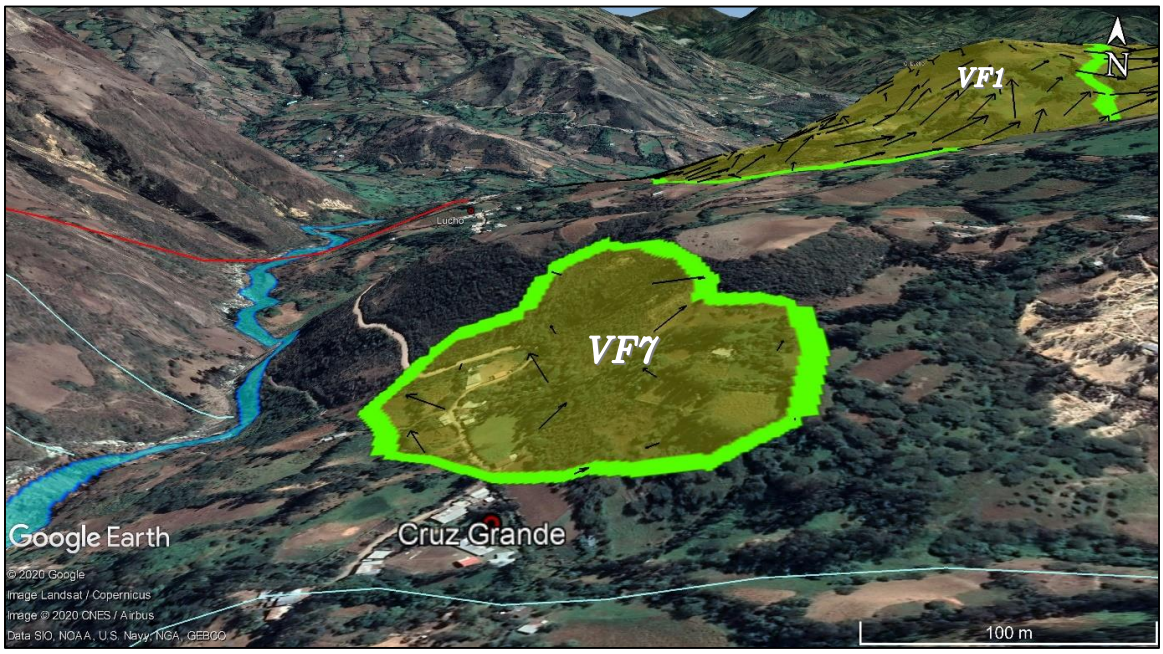


Figura 74. Vista panorámica del relieve con los vectores de desplazamientos resultantes de la zona VF7 (polígono verde). Hay una notable incongruencia entre la dirección de propagación de los vectores de desplazamientos resultantes y las orientaciones de las pendientes presentes en dicha zona. La línea roja representa el polígono del área total de estudio y la de color azul el rio Huancabamba. Fuente: Google Earth.

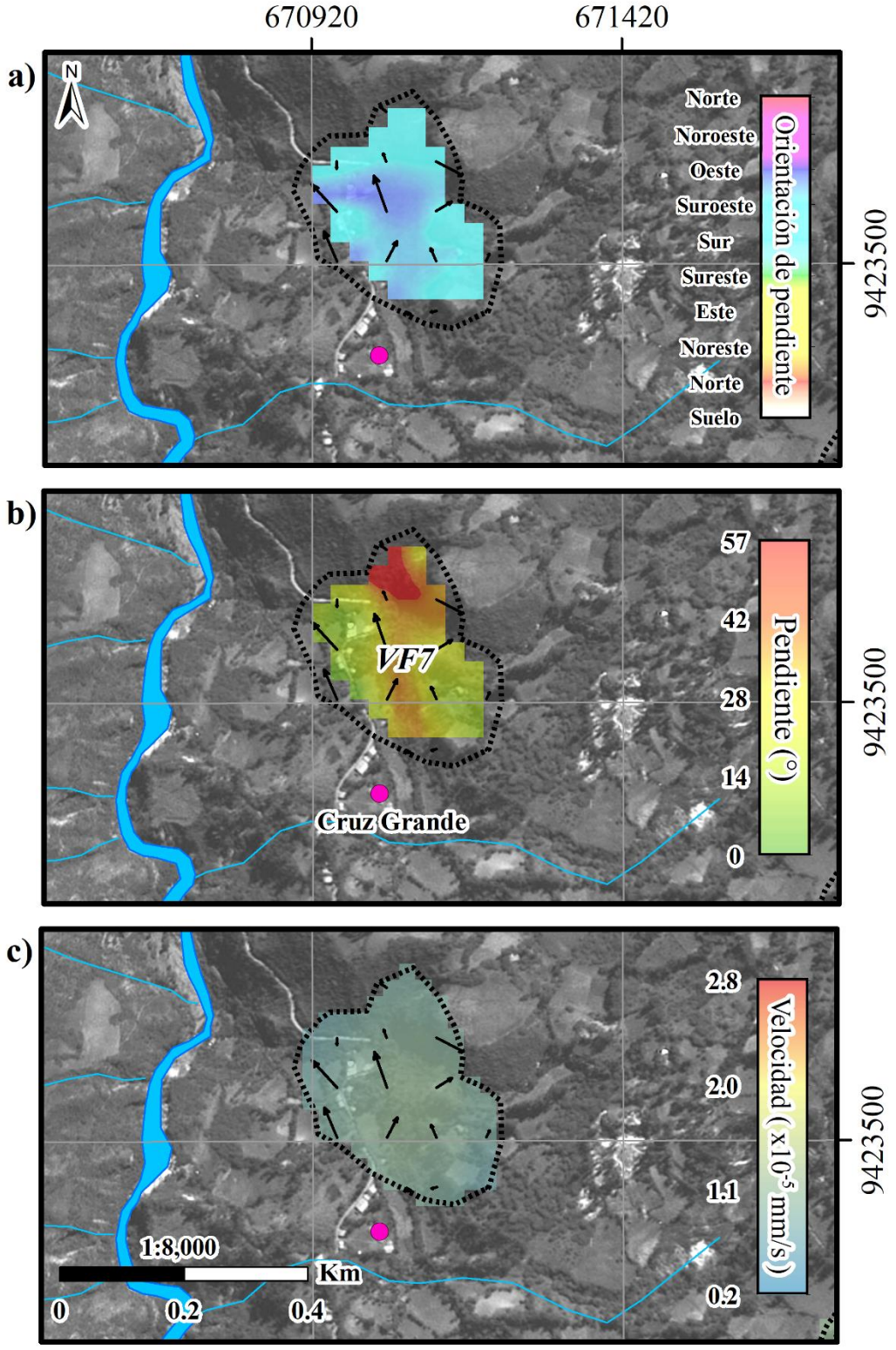


Figura 75. Distribución de los vectores de desplazamientos resultantes presentes en la zona VF7, sobre secciones de mapas con a) orientación de pendientes, b) grado de pendientes y c) estimaciones de las velocidades de desplazamientos. Algunas direcciones de los vectores de la zona VF7 no concuerdan con la región donde están distribuidos, principalmente aquellos que esta dispersos en las regiones de color celeste (sur o suroeste).

5.2.2.6 Zona VF9

La vista en relieve de la zona VF9 se aprecia en la figura 76, donde también se observa la distribución de los vectores de desplazamiento en dicha zona, al margen derecho del cerro Colorado y a menos de medio kilómetro del centro poblado Cabezas. Por otro lado, en la figura 77a, se muestra nuevamente la distribución de los vectores de desplazamientos, sobre un mapa con las orientaciones de las pendientes presentes en dicha zona. Se aprecia una notable acumulación de estos vectores hacia la región de color celeste, en donde las pendientes están dirigidas hacia el sureste desde 112° hasta alrededor de 157°, y al sur con 157° hasta 202°. Mientras que los vectores que se encuentran al sur de la zona VF9, se propagan en dirección este (67°-112°).

Estos vectores están sobre pendientes con valores desde 5° hasta mayores a 40°. Las pendientes de mayor grado se encuentran cerca de la cima del cerro Colorado, mientras que al este de dicho cerro se ubican pendientes con valores de 9° a 18°, las cuales están marcadas por una notable acumulación de vectores, como se observa en la figura 77b. Por otra parte, en la figura 77c, se observa la disposición de los vectores de desplazamiento sobre el campo de velocidades en dicha zona y abarca un rango de valores entre $0.8x10^{-5}$ mm/s y $1.3x10^{-5}$ mm/s.

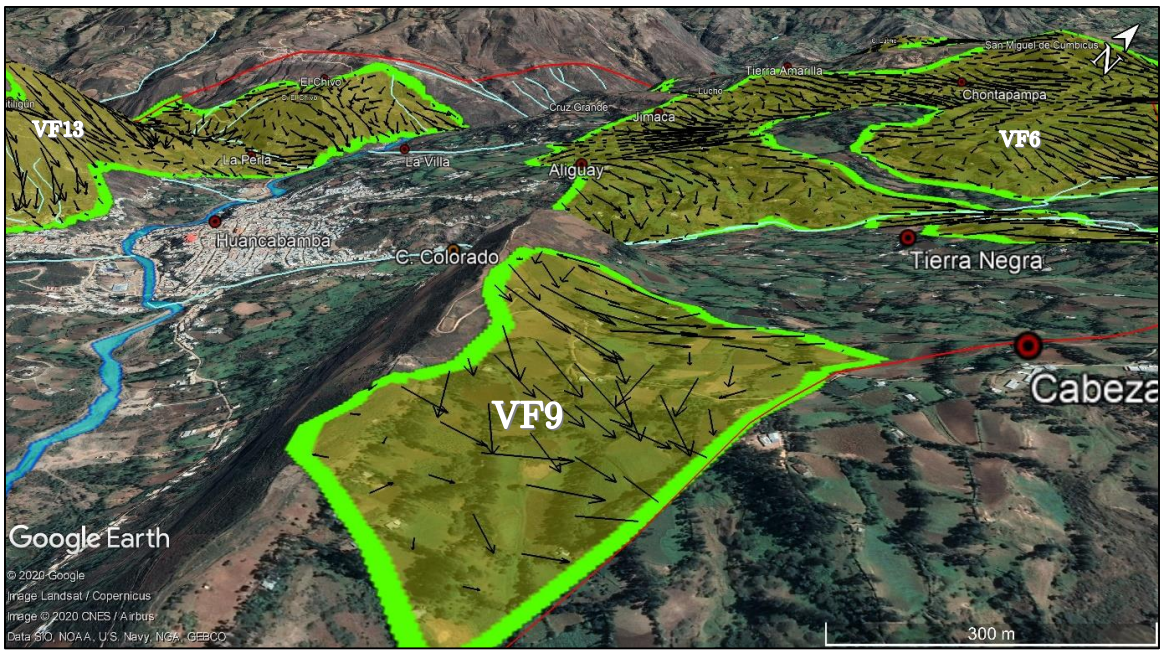


Figura 76. Vista panorámica del campo vectorial de los desplazamientos resultantes en el relieve de la zona VF9 (polígono verde). La línea roja representa el polígono del área total de estudio y la línea azul al rio Huancabamba. Fuente: Google Earth.

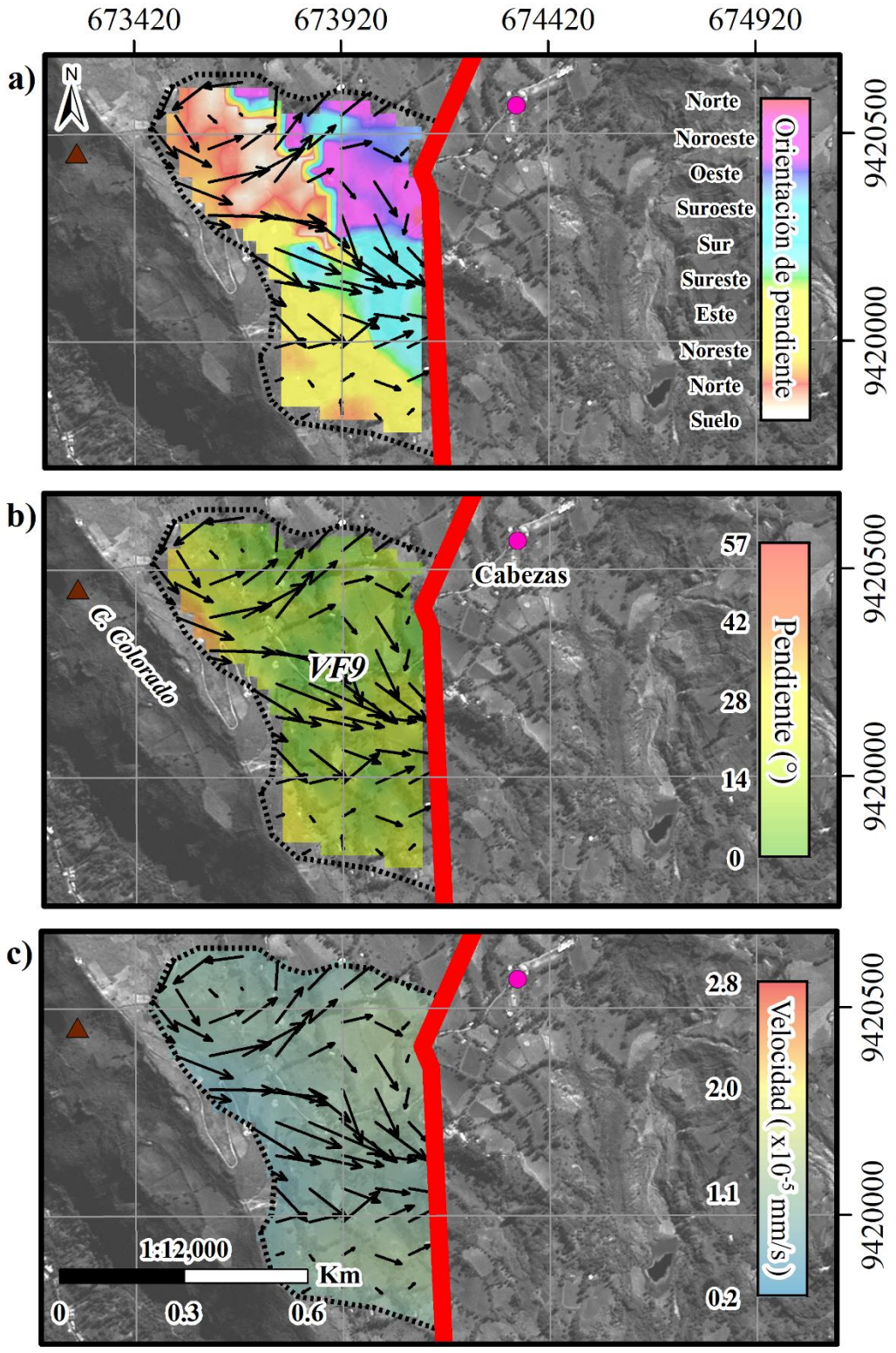


Figura 77. Distribución de los vectores de desplazamientos en la zona VF9, sobre secciones de mapas con a) orientación de pendientes, b) grado de pendientes y c) estimaciones de las velocidades de desplazamientos. Se aprecia una notable acumulación de vectores en la parte media de la zona VF9 con direcciones de propagación hacia el este y noreste. Esto se debe al grado de las pendientes (>15°) y las elevaciones (>2130 m.s.n.m) a la que se encuentra dicha zona.

5.2.2.7 Zona VF10

En la figura 78, se presenta la vista panorámica en relieve de la distribución de los vectores de desplazamientos resultantes sobre la zona VF10, delimitado por el polígono en verde, mientras que en la figura 79a, se muestra la disposición de los vectores de desplazamientos sobre un mapa con las orientaciones de las pendientes presentes en dicha zona. Se aprecia una notable acumulación de estos vectores hacia el margen izquierdo del rio Huancabamba, donde la región de color amarillo representa las pendientes con orientación al noreste y valores desde 22° hasta alrededor de 67°. También se observa regiones con orientación al este con valores de 67° hasta 112°. Mientras que los vectores que se encuentran al noreste del centro poblado El Banco, se propagan casi de forma perpendicular a la orientación norte (>22°) de las pendientes en aquella región. En la figura 79b, se aprecian los altos valores de pendientes (15° y 28°) ubicadas en la parte central de VF10 hasta abarcar las cercanías del rio, mientras que pendientes de menor grado (1°-9°), se encuentran en El Banco y sus cercanías. Por otro lado, en la figura 79c, se observa la distribución de los vectores de desplazamiento sobre el campo de velocidades, abarcando un rango con magnitudes entre $0.4x10^{-5}$ mm/s y $1.8x10^{-5}$ mm/s. Cabe mencionar que las velocidades con mayores magnitudes se encuentran muy cerca al centro poblado El Banco.

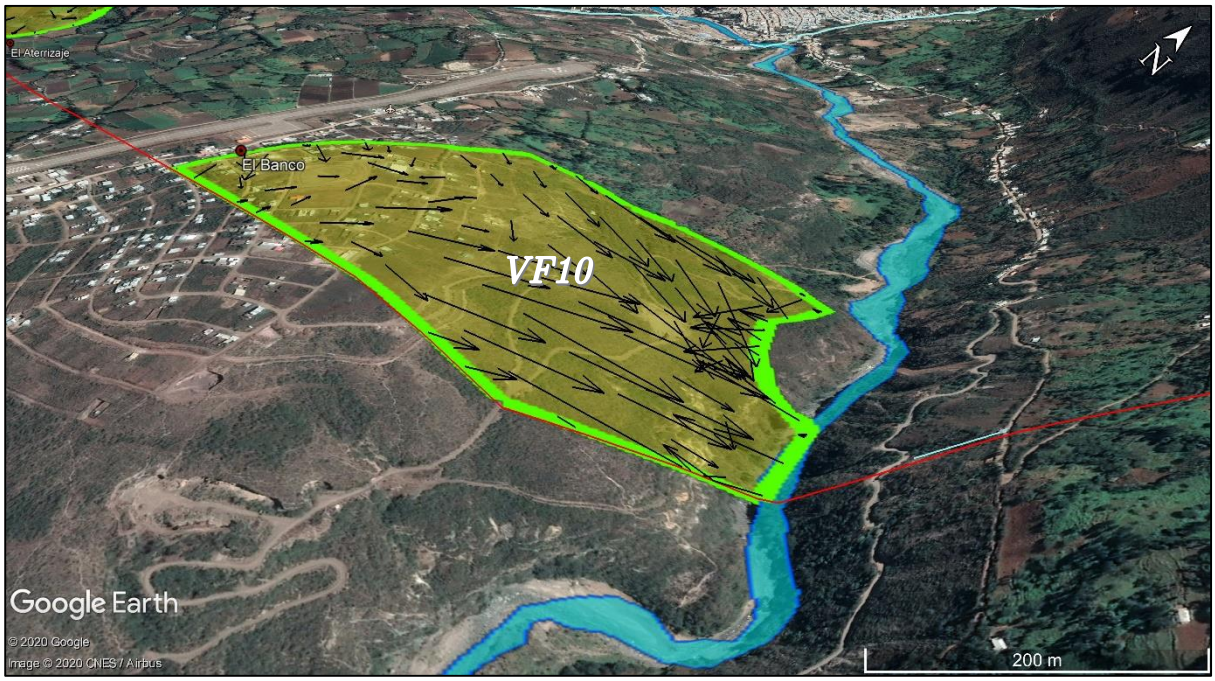


Figura 78. Vista panorámica del campo vectorial de los desplazamientos resultantes en el relieve de la zona VF10 (polígono verde). La línea roja representa el polígono del área total de estudio y el polígono azul, parte del rio Huancabamba. Fuente: Google Earth.

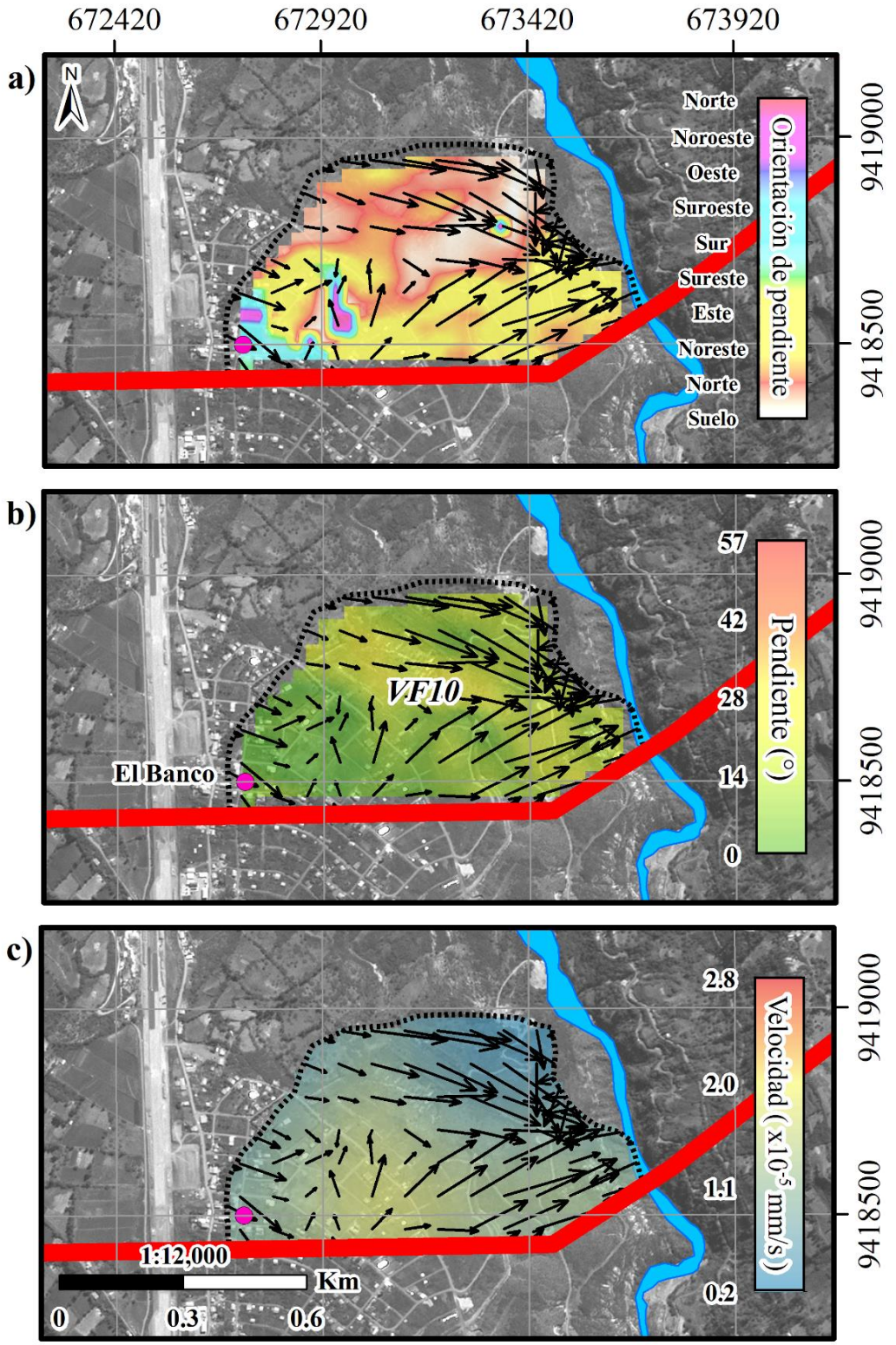


Figura 79. Distribución de los vectores de desplazamientos resultantes en la zona VF10, sobre secciones de mapas de a) orientación de pendientes, b) grado de pendientes y de c) estimaciones de las velocidades de desplazamientos. Se aprecia una notable acumulación de vectores en cerca al margen izquierdo del rio Huancabamba. Esto se debe posiblemente al efecto de desgaste de la superficie terrestre por el cauce del rio, generando el avance progresivo del movimiento en masa en dicha zona.

5.2.2.8 Zona VF11 y zona VF12

En la figura 80, se presenta la vista panorámica en relieve de las zonas VF11 y VF12, con la distribución de los vectores de desplazamiento para cada zona. De forma general, los vectores presentes en ambas zonas presentan tendencia de propagación hacia el sur del área de estudio, delimitada por la línea roja. Se destaca también diferencia de elevación entre ambas zonas, mientras que la zona VF11 presenta elevaciones entre 2028 m.s.n.m y ~ 2080 m.s.n.m, la zona VF12 se encuentra entre 2098 m.s.n.m y ~ 2130 m.s.n.m. Por otra parte, en la figura 81a se observa la distribución del campo vectorial de la zona VF11 y VF12, sobre el mapa con orientaciones de las pendientes, en donde VF11 presenta regiones orientadas hacia el este (67°-112°) y sureste (112°-157°), mientras que VF12 contiene orientaciones hacia el suroeste (202°-247°) y otras hacia el sureste (112°-157°). Luego, en la figura 81b, VF11 presenta pendientes con valores desde los 2° hasta mayores a 19°, donde las regiones con pendientes de mayor grado se encuentran al norte. En cambio, VF12 contiene pendientes con valores desde 3° hasta mayores a 9°. Por otro lado, en la figura 81c se muestran los vectores de desplazamiento sobre el campo de velocidades de ambas zonas analizadas, donde VF11 contiene velocidades entre $1.1x10^{-5}$ mm/s y $1.3x10^{-5}$ mm/s, mientras que en la zona VF12, se estimaron magnitudes de velocidades entre $0.9x10^{-5}$ mm/s a $1.2x10^{-5}$ mm/s.

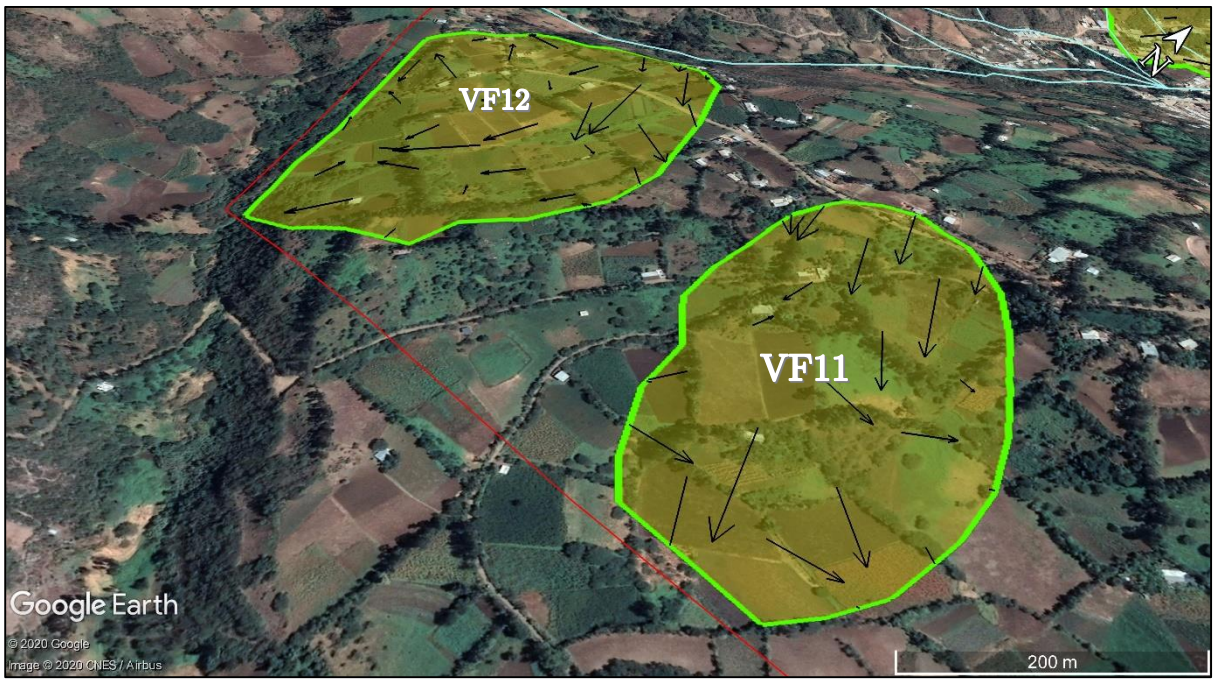


Figura 80. Vista panorámica del campo vectorial de los desplazamientos resultantes en el relieve de las zonas VF6 y VF8 (polígonos verdes). Hay una notable tendencia de dirección de propagación de los vectores hacia el sur y sureste. La línea roja representa el polígono del área total de estudio. Fuente: Google Earth.

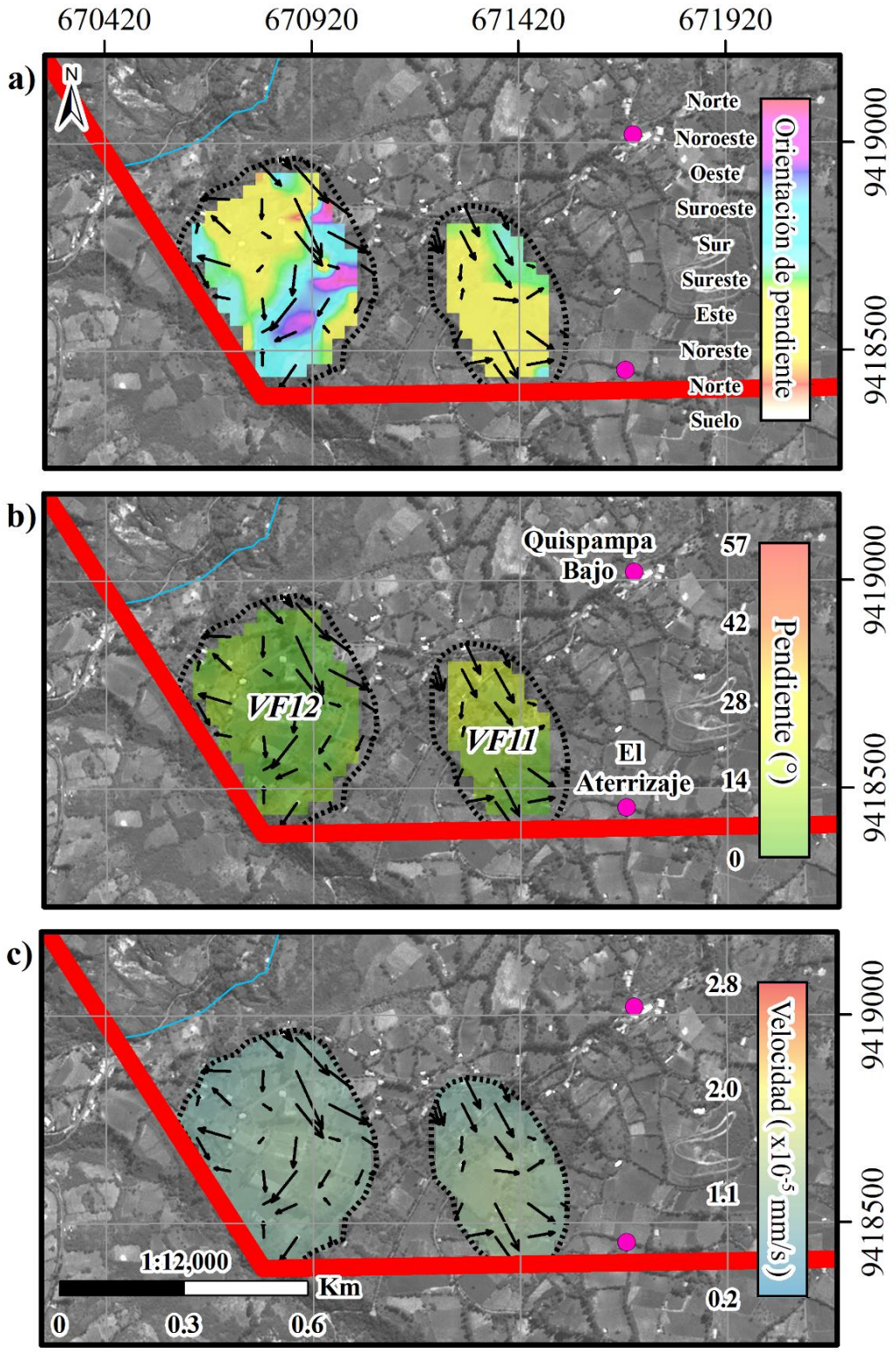


Figura 81. Distribución de los vectores de desplazamientos resultantes en las zonas VF11 y VF12, sobre secciones de mapas de a) orientación de pendientes, b) grado de pendientes y c) estimaciones de las velocidades de desplazamientos.

5.2.2.9 Zona AR13

La distribución de los vectores de desplazamiento sobre el relieve de la zona VF13, se representa en la en la figura 82, la cual está delimitada por el polígono de verde. De forma general, nuevamente se observa una tendencia de propagación por parte de los vectores de desplazamiento, hacia el rio Huancabamba (margen izquierdo), abarcando también partes de los cerros El Chivo y Guitiligún, como también el centro poblado La Perla, al oeste de la ciudad de Huancabamba. La línea de color rojo representa parte de los límites del área total de estudio y las líneas celestes las quebradas que cruzan la zona VF13. Se destaca también las elevaciones presentes en dicha zona, la cual cuenta con elevaciones desde 1920 m.s.n.m hasta ~ 2350 m.s.n.m. Principalmente el cerro Guitiligún cuentan con elevaciones de grandes magnitudes. Por otra parte, en la figura 83 se presenta la distribución del campo vectorial de la zona VF13, sobre el mapa con las orientaciones de las pendientes. En donde la región sur de esta zona, los vectores se dirigen hacia el noreste (22°-67°) y este (67°-112°), representados por las regiones de color amarillo y naranja, respectivamente. Luego, en la parte central de VF13 los vectores presentan dirección de propagación norte (> 22°), mientras que en la parte norte de VF13, los vectores tienden a dirigirse hacia el sur (157°-202°) y sureste (112°-157°).

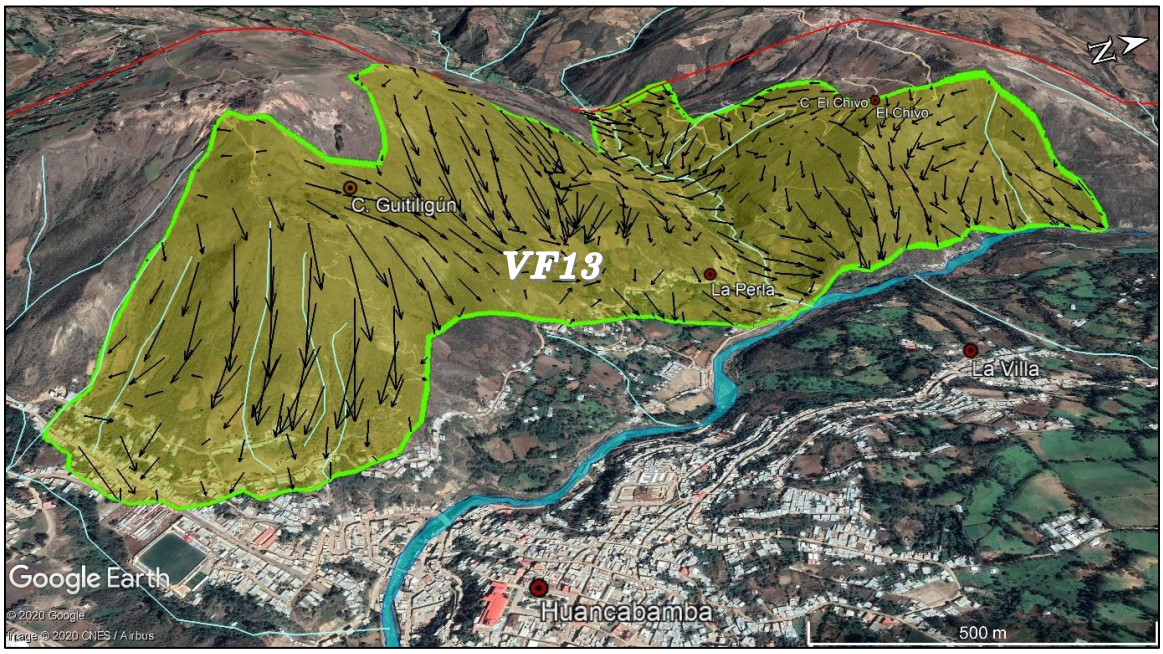


Figura 82. Vista panorámica en relieve del campo vectorial de los desplazamientos resultantes en la zona VF13 (polígono verde). Hay una notable tendencia de dirección de los vectores de desplazamiento hacia el margen izquierdo del rio Huancabamba. La línea roja representa el polígono del área total de estudio y las celeste el rio Huancabamba. Fuente: Google Earth.

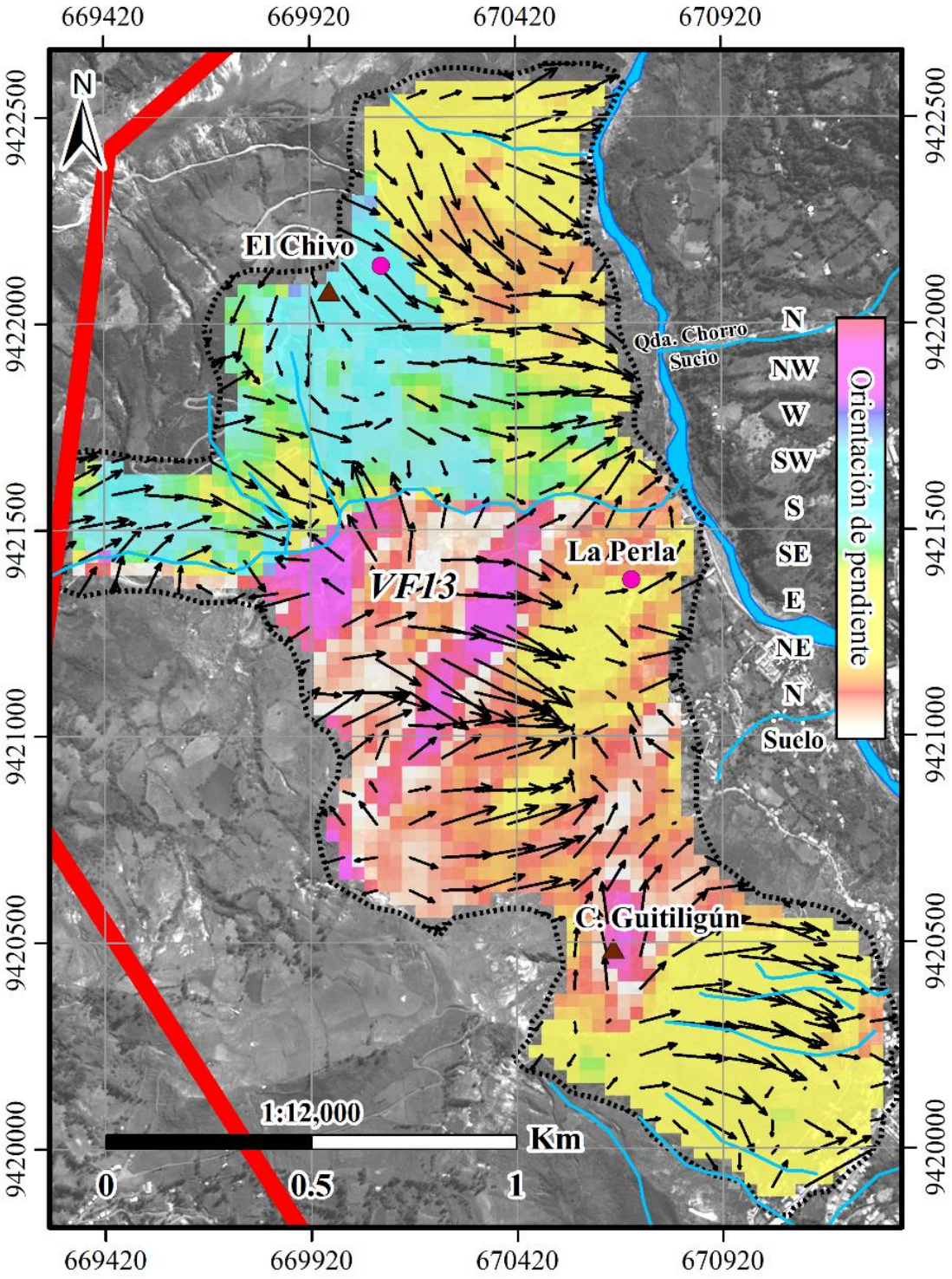


Figura 83. Distribución de los vectores de desplazamientos resultantes presentes en la zona VF13, sobre el mapa de orientación de pendientes a escala 1:12000. Las quebradas y el margen izquierdo del rio Huancabamba (representadas por las líneas celestes), son regiones en donde los vectores de desplazamientos tienden a dirigirse.

En la figura 84, se observa la distribución de los vectores de desplazamientos sobre los valores de las pendientes presentes en el relieve terrestre de dicha zona, abarcando magnitudes desde 2° hasta mayores a 49°, donde las de mayor valor (~ 50°) se encuentran en la parte este del cerro Guitiligún, colindando al barrio Ramón Castilla y en la parte sureste del cerro El Chivo. Los valores de las pendientes determinadas en la parte central de VF13 oscilan entre 24° hasta mayores a 47°, ubicándose en La Perla los valores más altos. Cabe recalcar que en las regiones donde se concentra mayores grados de pendientes, no necesariamente se ubican los grandes desplazamientos y los, ya que depende mucho también de la morfología de la superficie terrestre y el tipo de suelo en que se está realizando el análisis.

Por otro lado, en la figura 85 se observa la disposición de los vectores de desplazamiento sobre el campo de velocidades. Para la zona sur de VF13, cercanas al cerro Guitiligún, se estimaron magnitudes de velocidades entre $0.8x10^{-5}$ mm/s y $1.3x10^{-5}$ mm/s, en donde la región cercana al Barrio Ramón Castilla evidencia el desarrollo de desplazamientos con bajas velocidades ($<1.0x10^{-5}$ mm/s). Luego, para la parte central de VF13, se estimaron magnitudes de velocidades desde $1.2x10^{-5}$ mm/s a $1.7x10^{-5}$ mm/s, en donde las de mayores magnitudes se encontraron al suroeste de La Perla. Finalmente, la región norte de VF13, presenta velocidades entre $1.0x10^{-5}$ mm/s y $1.4x10^{-5}$ mm/s, centrándose en el cerro El Chivo las de mayores magnitudes, y en dirección hacia el cruce del rio Huancabamba y la parte final de la quebrada Chorro Sucio.

Recapitulando lo analizado en las secciones anteriores, se puede afirmar que las regiones que concentran grandes magnitudes de desplazamiento están fuertemente conectadas con el grado de pendiente y la orientación de estas mismas, mientras que las velocidades de desplazamiento muchas veces depende de la ubicación de las zonas y el tipo de suelo presente. Recordar que la magnitud del desplazamiento estimado en los 420 días de estudio para esta prueba, es correlativa a la velocidad determinada en cada región analizada. Esto quiere decir que, a mayor magnitud de desplazamiento, se estimará grandes velocidades.

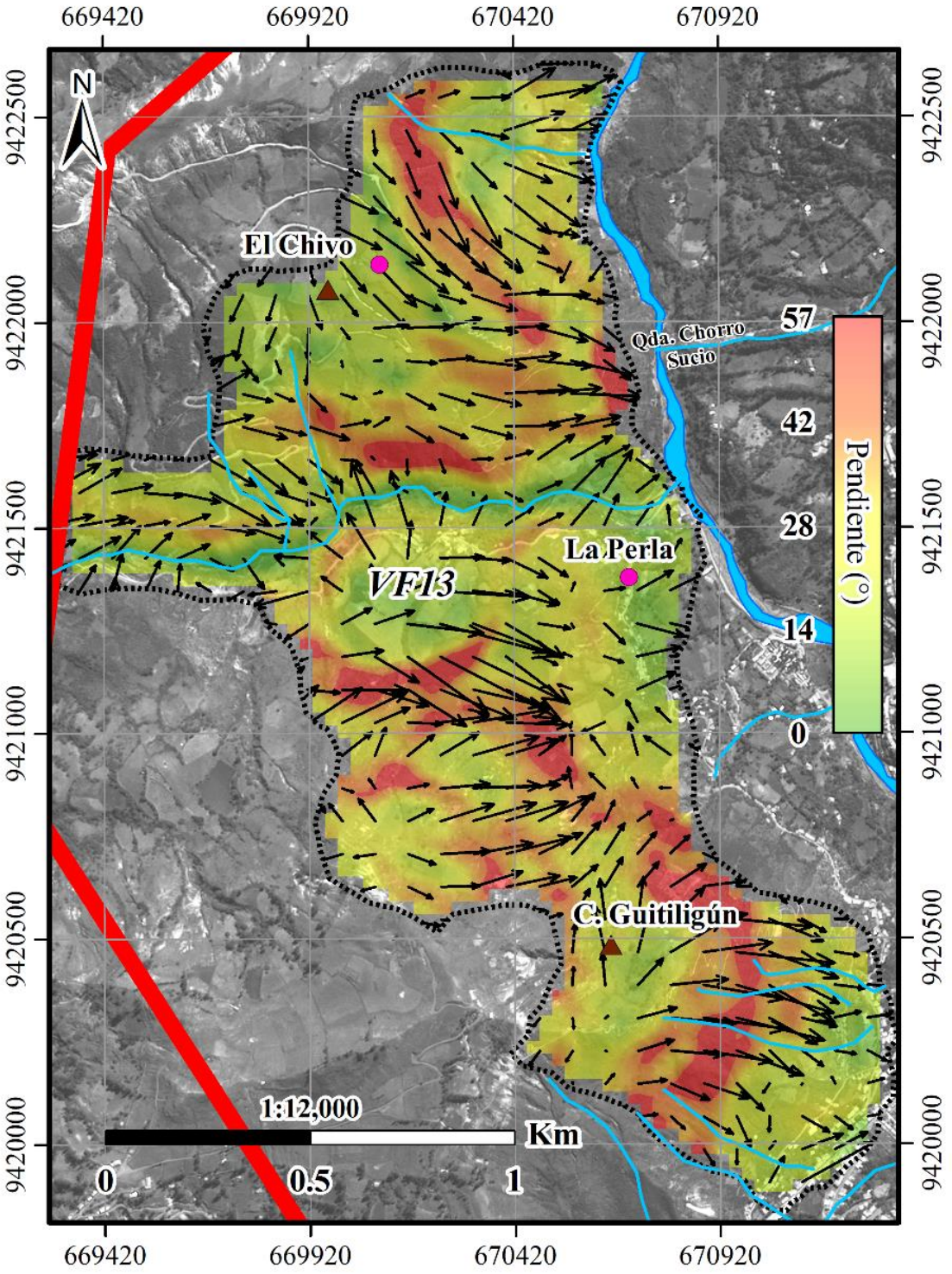


Figura 84. Distribución de los vectores de desplazamientos resultantes presentes en la zona VF13, sobre el mapa de grado de pendientes.

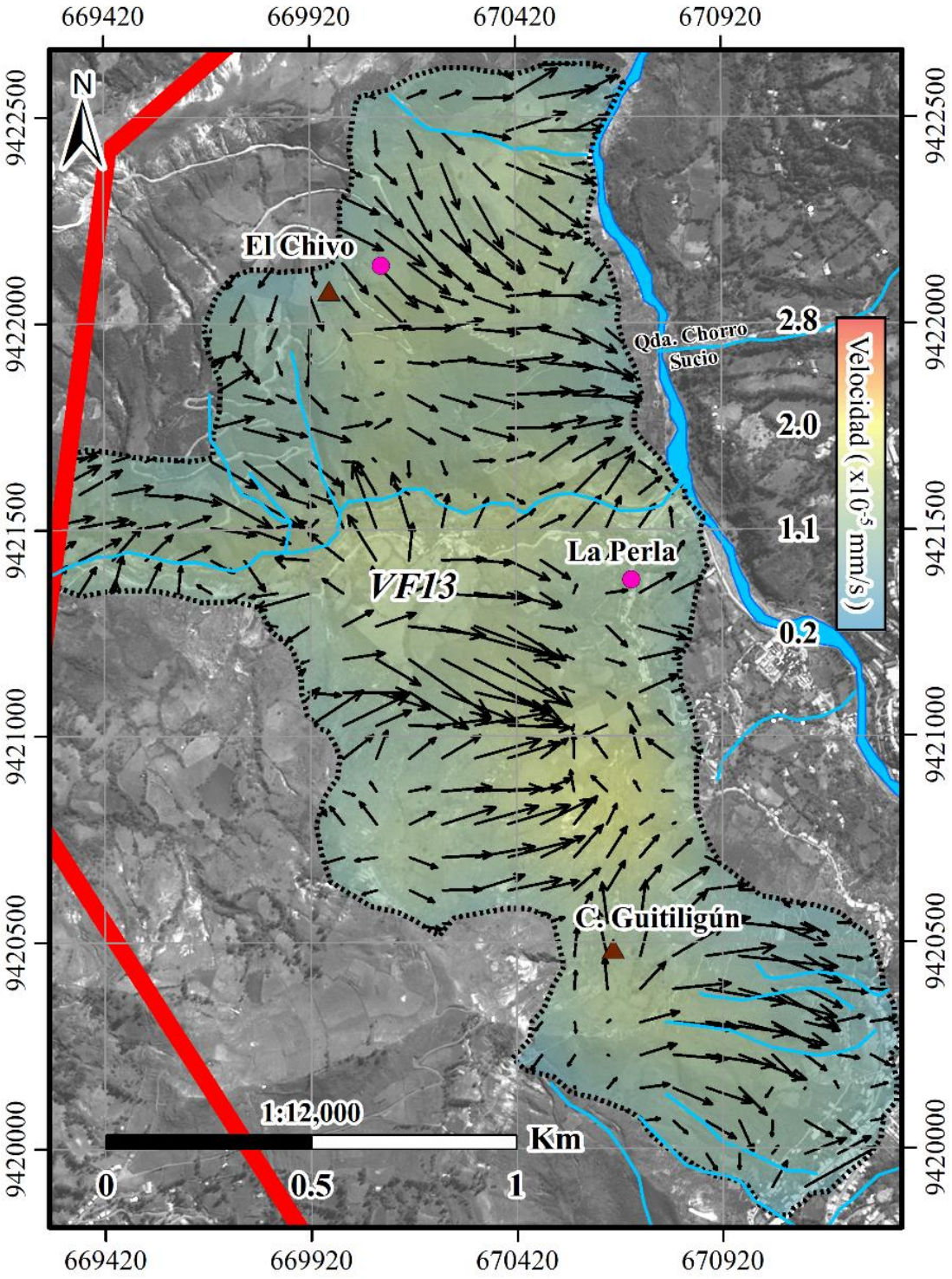


Figura 85. Distribución de los vectores de desplazamientos resultantes presentes en la zona VF13, sobre mapa de las velocidades de desplazamientos. La región que presenta menores magnitudes de velocidades (<1.0x10-5 mm/s) se encuentra al sur de VF13 y las de mayores magnitudes están ubicadas en la parte central de dicha zona (>1.2x10^{-5} mm/s).

Es notable también el papel que juegan las zonas con presencia de extensa hidrografía, ya que como se observa en muchos casos, estás influyen directamente en la dirección de los vectores de desplazamiento, ya sea posiblemente por la erosión que provocan a sus regiones colindantes o por la filtración de los fluidos que pasan por sus cauces. Esto se denota más en la parte norte de la ciudad de Huancabamba, en la cual existen varios canales de regadíos que fueron edificados por los pobladores a través de los años, lo cual se ha ido desarrollando la filtración de agua en estas zonas, en dirección al sur y combinado con el grado de pendientes, las elevaciones presentes y otros factores, hacen de esas zonas muy propensas al desarrollo de desplazamientos muy lentos, a través del transcurso del tiempo.

Capítulo 6

Conclusiones

En la presente tesis se ha determinado, cuantificado y analizado las principales características de zonas con presencia de mayor deformación superficial terrestre, respecto a diferentes lapsos de tiempo, en la ciudad de Huancabamba. Siendo los desplazamientos y la dinámica de estos, los parámetros presentes en la mayoría de procesos de remoción de masa, que generalmente se analizan en primera instancia para poder determinar el alcance y el tipo de estos. Para lograr estos objetivos, se utilizó la correlación subpíxel de imágenes ópticas satelitales, propuesta en algoritmos, a través del software COSI-Corr. Resultando las cuantificaciones y reconocimiento de los desplazamientos presentes en el área de estudio.

Para validar los resultados de las correlaciones subpíxel, se ha utilizado las estimaciones propuestas por diferentes estudios (geodésicos, morfodinámicos y geológicos) realizados desde el 2017 hasta el 2019, de esta manera se determinó su congruencia y paralelamente se analizó la asociación de factores detonantes para la activación de dichos procesos de remoción de masa en el área de estudio. El análisis y discusión de los resultados obtenidos, ha permitido llegar a las siguientes conclusiones:

1. El análisis y correlación de imágenes satelitales permitió identificar un total de 14 zonas de mayor deformación superficial de acuerdo a los resultados de las principales pruebas de correlación (NQ1 y NP12). De la prueba NQ1 se denota las zonas ZR1, ZR2 y ZR3, las cuales están contenidas dentro de la ciudad de Huancabamba. Los desplazamientos en estas tres zonas, fueron determinados en un lapso de 719 días y oscilan entre 0.10 m y 0.25 m. Respecto a los resultados de la prueba NP12, los cuales fueron obtenidos de una ventana temporal de 420 días, los desplazamientos estimados en dichas zonas varían desde 0.17 m hasta 0.40 m, y en casos puntuales mayores a esta última cifra, llegando hasta medidas de 0.80 m.

2. Las principales zonas de mayor inestabilidad, determinadas en la ciudad de Huancabamba presentan direcciones comunes de propagación hacia el sur y este, mientras que las zonas

externas a la ciudad presentan propagación en diversas direcciones, no encontrando una dirección de propagación en particular para todas ellas. La mayor cantidad de zonas que presentan deformaciones superficiales notables (>0.30 m), se encuentran al norte de la ciudad de Huancabamba, mientras que la ciudad de Huancabamba presenta mayor inestabilidad en casi toda su extensión, a excepción de la parte central y parte del barrio Ramón castilla, en el cual los desplazamientos son de escalas menores a 0.10 m.

3. De acuerdo a la clasificación propuesta por Varnes y Cruden (1996), se determinó que las remociones en masa presentes en las zonas de mayor deformación superficial son de tipo muy lento, con tasas de velocidades máximas de propagación de 0.14 m/año (prueba NQ1) y 0.84 m/año (prueba NP12). Demostrando de esta forma que las remociones en masa presentes fuera de la ciudad se propagan a una mayor velocidad.

4. En el desarrollo de las cuantificaciones y la ubicación espacial de las zonas de mayor deformación superficial, se determinó que existe una posible zona con falsos desplazamientos (VF7), ya que la mayoría de las direcciones de propagación de los vectores de desplazamientos presentes en dicha zona, no concuerda con la orientación naturales de las pendientes presentes en dicha región, lo cual hace especular que estos desplazamientos realizan un avance en contra de la propagación natural causado conjuntamente por la gravedad terrestre y las pendientes presentes por la morfología de dichas regiones. También se encontraron otras zonas con falsos desplazamientos, pero estas fueron descartadas antes de seguir con el proceso de análisis de resultados, principalmente provocados por la presencia de nubes y grandes sombras (sección 4.5.1).

5. A pesar que algunas de las estimaciones obtenidas con los procesos de correlación subpíxel de los desplazamientos, no concuerdan exactamente con las medidas realizadas por los estudios que se usaron para la validar los resultados de la presente tesis, se pude resaltar la importancia del software COSI-Corr para determinar las zonas de mayor deformación y sus extensiones superficiales. La coherencia de los desplazamientos y sus cuantificaciones, quedan por verificar más detalladamente, conjuntamente con otros estudios con características más similares al presente (mismas ventanas temporales, mayor cantidad de imágenes y de distintas plataformas), de esta forma se estará determinando mejores resultados y más precisos.

6. Estos resultados demostraron que, como todo método o técnica aplicada a un determinado estudio, no es exacto, lo cual no lo hace menos inferior ni menos importante para su aplicación en estudios geofísicos o afines, por lo que se puede afirmar que aplicando de forma parcial los subprocesos del software COSI-Corr, se puede obtener resultados muy buenos, tanto en estimaciones de desplazamientos como zonificación y ubicación de estos mismos. Para este estudio se obtuvieron buenos resultados tanto en estimaciones y ubicación de las zonas de mayores desplazamientos, pero inclinándose mayoritariamente a la determinación de mejores resultados en el campo de zonificación y ubicación de dichas zonas. Pero, ¿Por qué plantear esto? Pues la respuesta yace principalmente en las magnitudes de los desplazamientos, ya que estos pueden variar dependiendo de las ventanas temporales en que se desarrollen las pruebas, pero las zonas en que se detectan estas magnitudes es muy difícil que varíen de un lugar a otro, ya que como se observó y demostró en los capítulos 4 y 5, los deslizamientos y en general, los procesos de remoción de masa detectados en la ciudad de Huancabamba y sus alrededores son de tipo muy lento, lo cual significa que su propagación y avance están a escalas milimétricas al pasar los años, por lo que los resultados de zonificación son más fiables que los resultados de cuantificación de desplazamientos, pero no por eso dejan de ser menos importantes.

7. El análisis correlativo de datos permitió determinar que algunos de los factores que contribuyeron al avance y/o detonación de los deslizamientos, son la sismicidad y la precipitación acumulada. Siendo las tasas de desplazamientos de 3 mm a 19 mm (cosísmicos) y de 2 mm a 11 mm (por precipitación acumulada). Estos resultados permitieron evidenciar que Huancabamba está situado sobre deslizamientos activos, los cuales, pueden acelerarse de manera súbita ante la ocurrencia de agentes detonantes.

8. El presente estudio también permitió determinar que los factores que condicionan la estimulación y el proceso muy lento de avance de los deslizamientos, son el factor litológico y las pendientes, los cuales controlan la configuración del terreno junto a los principales agentes activadores como las intensas precipitaciones pluviales, la acción hídrica antrópica y la sísmica presente a través del tiempo.

Bibliografía

AIRBUS. (2019). *SPOT 6/7 Imagery - User Guide* (L. Coeurdevey & J. Soubirane (eds.); p. 62). Airbus Defence and Space Intelligence. https://n9.cl/gawxo

Artigao, M., Rubio, E., Díez, S., & Caselles, V. (2005). Técnicas de correlación cruzada en el registrado de imágenes de diferente resolución espacial. *Aet.Org.Es*, *1*, 21–23. http://aet.org.es/congresos/xi/ten124.pdf

Ayoub, Francois. (2014). *Monitoring morphologic surface changes from aerial and satellite imagery, on Earth and Mars*.

Ayoub, François, Leprince, S., & Keene, L. (2017). *User's Guide to COSI-CORR Co-registration of Optically Sensed Images and Correlation* (pp. 1–38). California Institute of Technology.

Baghdadi, N., & Zribi, M. (2016). Optical Remote Sensing of Land Surface. In N. Baghdadi & M. Zribi (Eds.), *Optical Remote Sensing of Land Surface* (First edit). ISTE Press - Elsevier. https://doi.org/10.1016/c2015-0-01220-5

Blaber, J., Adair, B., & Antoniou, A. (2015). Ncorr: Open-Source 2D Digital Image Correlation Matlab Software. *Experimental Mechanics*, *55*(6), 1105–1122. https://doi.org/10.1007/s11340-015-0009-1

Bontemps, N., Lacroix, P., & Doin, M. P. (2018). Inversion of deformation fields time-series from optical images, and application to the long term kinematics of slow-moving landslides in Peru. *Remote Sensing of Environment*, *210*(February), 144–158. https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.02.023

Bontemps, N., Lacroix, P., Larose, E., Jara, J., & Taipe, E. (2020). Rain and small earthquakes maintain a slow-moving landslide in a persistent critical state. *Nature Communications*, *11*(1), 1–10. https://doi.org/10.1038/s41467-020-14445-3

Bouali, E. H., Oommen, T., & Escobar-Wolf, R. (2019). Evidence of instability in previously-mapped landslides as measured using GPS, optical, and SAR data between 2007 and 2017: A case study in the Portuguese bend landslide complex, California. *Remote Sensing*, *11*(8), 1–20. https://doi.org/10.3390/rs11080946

CALTECH. (2004). *Cosi-Corr*. Technique Flow Chart. https://n9.cl/bndl

Camarillo-Peñaranda, J. R., Saavedra-Montes, A. J., & Ramos-Paja, C. A. (2013). Recomendaciones para Seleccionar Índices para la Validación de Modelos. *TecnoLógicas*, *August 2017*, 109. https://doi.org/10.22430/22565337.372

Caporossi, P., & Mazzanti, P. (2018). Digital Image Correlation (DIC) Analysis of the 3 December 2013 Montescaglioso Landslide (Basilicata , Southern Italy): Results from a Multi-Dataset Investigation. *International Journal of Geo Information*, *7*, 1–25. https://doi.org/10.3390/ijgi7090372

CEREN-PNUD. (2000). *Octubre del 2000*. Instituto Nacional de Defensa Civil (INDECI). https://n9.cl/rwjfz

Chang, L. C., & Hurtado, J. E. A. (1991). *Deslizamientos y Aluviones en el Perú*. CISMID.

Córdova, A. (2018). *Estudio morfodinámico del ámbito de la ciudad de Huancabamba y alrededores comprendiendo las zonas con afectación originada por el movimiento desplazatorio del terreno, provincia de Huancabamba, Piura*.

Córdova, N. (2019). *Evolución morfodinámica de las laderas montañosas de la ciudad de Huancabamba y su relación con el desplazamiento del terreno, Piura-Perú*. Universidad Nacional de Piura.

De La Ossa Pérez, R., & Vaquero, R. N. (2015). *Análisis de media de diferencia entre imágenes y su posterior implementación usando Matlab*.

Desrues, M., Lacroix, P., & Brenguier, O. (2019). Satellite pre-failure detection and in situ

monitoring of the landslide of the tunnel du Chambon, French alps. *Geosciences (Switzerland)*, *9*(7), 1–14. https://doi.org/10.3390/geosciences9070313

ESA. (2002). *SPOT-6 and SPOT-7 Commercial Imaging Constellation*. https://n9.cl/e8z2

ESRI. (2016). *Cómo funciona Kriging*. https://n9.cl/i2rp4

GISGeography. (2020). *DEM, DSM & DTM Differences – A Look at Elevation Models in GIS*. https://n9.cl/rckv4

GISResources. (2013). *Confused Between DEM, DTM and DSM !* https://n9.cl/aswcq

Gonzales, K., Fidel, L., Froger, J., Fruneau, B., Vidal, M., & Díaz, M. (2007). *Ground deformation detection in areas affected by landslides using InSAR technique*. *April 2006*, 1–9.

Highland, L. M., & Bobrowsky, P. (2008). The landslide Handbook - A guide to understanding landslides. In *US Geological Survey Circular* (Issue 1325). https://doi.org/10.3133/cir1325

INDECI. (2019). *Boletín Estadístico Virtual De La Gestión Reactiva*. *10*, 69. https://n9.cl/8rwa7

INGEMMET. (2020). *Evaluación por flujo de detritos en la quebreada Ungulo*.

Kaso, A. (2018). Computation of the normalized cross-correlation by fast Fourier transform. *PLoS ONE*, *13*(9), 1–16. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0203434

Keefer, D. K. (1984). Landslides caused by earthquakes. *Geological Society of America Bulletin*, *95*(4), 406–421.

Lacroix, P., Berthier, E., & Maquerhua, E. T. (2015). Earthquake-driven acceleration of slow-moving landslides in the Colca valley, Peru, detected from Pléiades images. *Remote Sensing of Environment*, *165*, 148–158. https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.05.010

Lacroix, P., Zavala, B., Berthier, E., & Audin, L. (2013). Supervised method of landslide inventory using panchromatic SPOT5 images and application to the earthquake-triggered landslides of Pisco (Peru, 2007, Mw8.0). *Remote Sensing*, *5*(6), 2590–2616. https://doi.org/10.3390/rs5062590

Leprince, S., Barbot, S., Ayoub, F., & Avouac, J. P. (2007). Automatic and precise orthorectification, coregistration, and subpixel correlation of satellite images, application to ground deformation measurements. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, *45*(6), 1529–1558. https://doi.org/10.1109/TGRS.2006.888937

Liou, K. (2002). *An introduction to atmospheric radiation* (R. Dmowska, J. Holton, & T. Rosby (eds.); Second Edi, Vol. 84). Elsevier.

Meijer, S. W. (2015). Surface displacement of a Himalayan debris-covered glacier derived from automated cross-correlations using imagery acquired with unmanned aerial vehicles. In *Physical Geography* (Issue June). Utrecht University.

Mergili, M., Marchant Santiago, C. I., & Moreiras, S. M. (2015). Causas, características e impacto de los procesos de remoción en masa, en áreas contrastantes de la región Andina. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*, *24*(2), 113–131. https://doi.org/10.15446/rcdg.v24n2.50211

Mneney, S. H. (2008). *An Introduction to Digital Signal Processing: A Focus on Implementation*. River Publishers ApS.

Ose, K., Corpetti, T., & Demagistri, L. (2016). Multispectral Satellite Image Processing. In N. Baghdadi & M. Zribi (Eds.), *Optical Remote Sensing of Land Surface: Techniques and Methods* (First edit, pp. 58–124). ISTE Press - Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-1-78548-102-4.50002-8

Ramirez, M. J. (1966). *Huancabamba: su historia, su geografía, su folklore*. Ministerio de Hacienda y Comercio.

Rodgers, K. (1993). *Manual Sobre el Manejo de Peligros Naturales en la Planificación para el Desarrollo Regional Integrado* (1st ed.). https://n9.cl/hivk

Scheidt, S. P., & Lancaster, N. (2013). The application of COSI-Corr to determine dune system dynamics in the southern Namib Desert using ASTER data. *Earth Surface Processes and Landforms*, *38*(9), 1004–1019. https://doi.org/10.1002/esp.3383

Scordilis, E. M. (2006). Empirical global relations converting MS and mb to moment magnitude. *Journal of Seismology*, *10*(2), 225–236. https://doi.org/10.1007/s10950-006-9012-4

SIGMUR. (2005). *Fotointerpretación y Teledetección*. SIG y Teledetección En La Universidad de Murcia. https://n9.cl/l2i3e

Silgado, E. (1978). Historia de los sismos más notables ocurridos en el Perú (1513 -1974). *Instituto de Geología y Minería*, *3*, 130.

Sobrino, J. A., Raissouni, N., & Kerr, N. (2000). *Teledetección*.

Stumpf, A., Malet, J. P., Puissant, A., & Travelletti, J. (2016). Monitoring of Earth Surface Motion and Geomorphologic Processes by Optical Image Correlation. In N. Baghdadi & M. Zribi (Eds.), *Land Surface Remote Sensing: Environment and Risks* (First edit, pp. 147–190). ISTE Press - Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-1-78548-105-5.50005-0

Suarez, J. (1998). Zonificación de Susceptibilidad Amenaza y Riesgo. In E. U. I. de Santander (Ed.), *Deslizamientos: Analisis Geotecnico* (pp. 528–587). UIS.

Turner, D., Lucieer, A., & de Jong, S. M. (2015). Time series analysis of landslide dynamics using an Unmanned Aerial Vehicle (UAV). *Remote Sensing*, *7*(2), 1736–1757. https://doi.org/10.3390/rs70201736

Universidad del Pais Vasco. (2020). *La Transformada Discreta y Rápida de Fourier*. https://n9.cl/tfourier

Varnes, D. J., & Cruden, D. M. (1996). Landslide types and processes. *Landslides: Investigation and Mitigation, Transportation Research Board Special Report*, *247*.

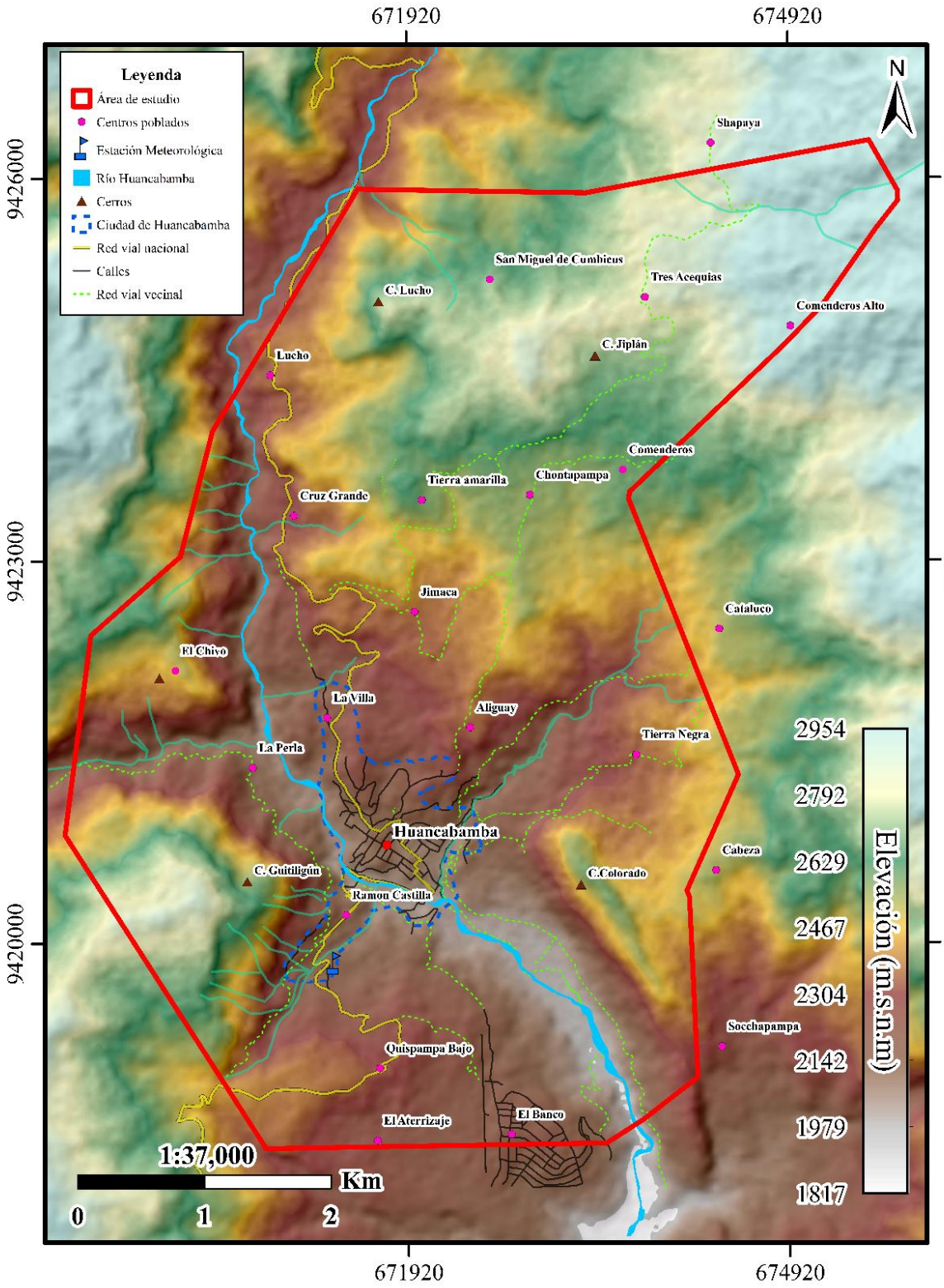
Vílchez, M. S., Luque Poma, G., & Rosado Seminario, M. (2009). *Zonas críticas por peligros geológicos en la región Piura. Primer reporte*. Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (INGEMMET).

Villegas-Lanza, J. C., Pamo, R., Berduzco, M., & Quiroz, W. (2019). *Mediciones Geodésicas en los deslizamientos que afectan a la ciudad de Huancabamba (2da campaña de medición)*. www.igp.gob.pe

Villegas-Lanza, J. C., Vivanco, P., & Mariana, V. (2018). *Informe Técnico por peligros geológicos en la ciudad de Huancabamba, Distrito y Provincia Huancabamba, Region Piura*.

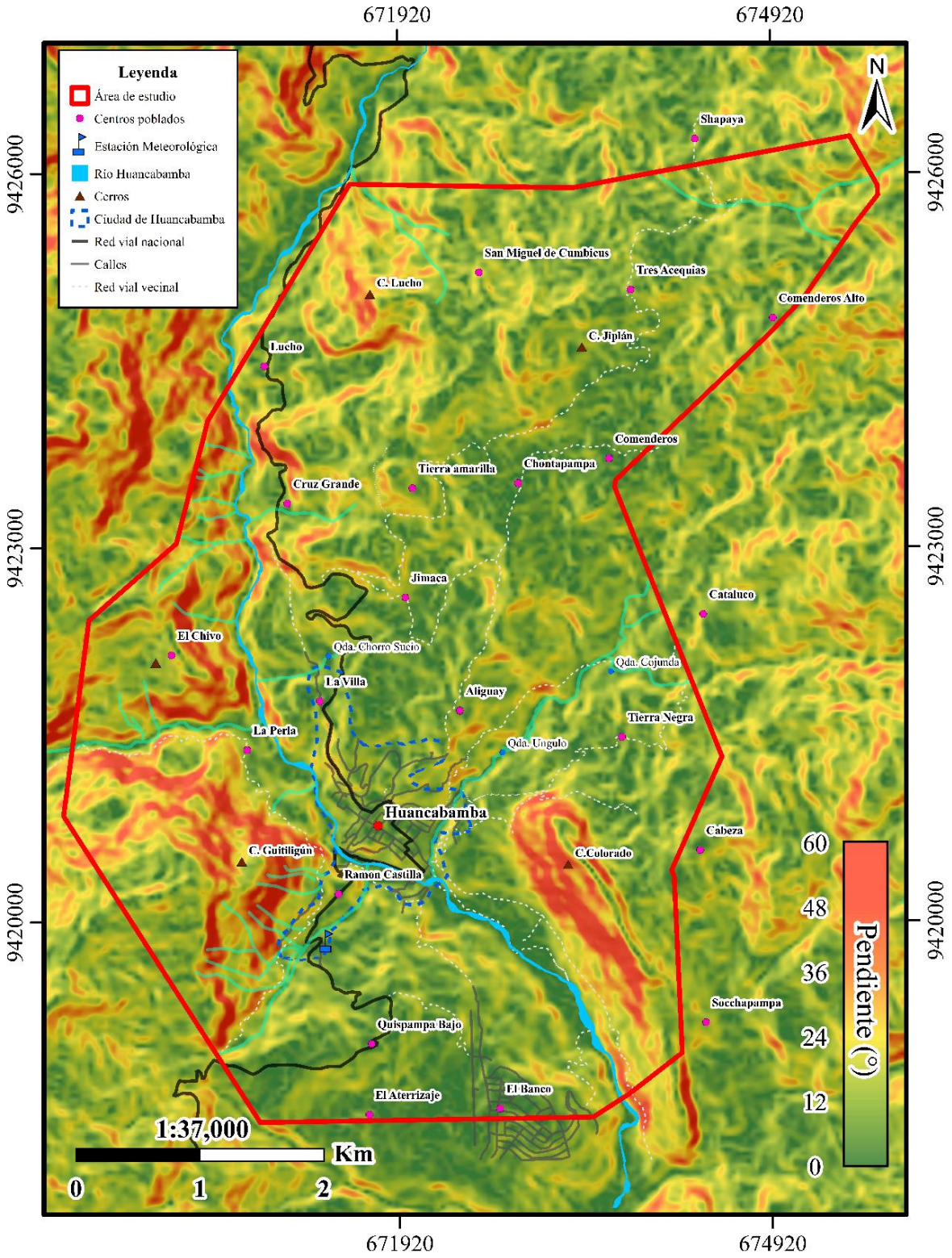
Yaseen, M. (2009). Evaluation of Optical Images Sub-Pixel Correlation for Estimating Ground Deformation. In *ITC, Enschede*. International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation Enschede.

Apéndice A: Mapa de elevaciones



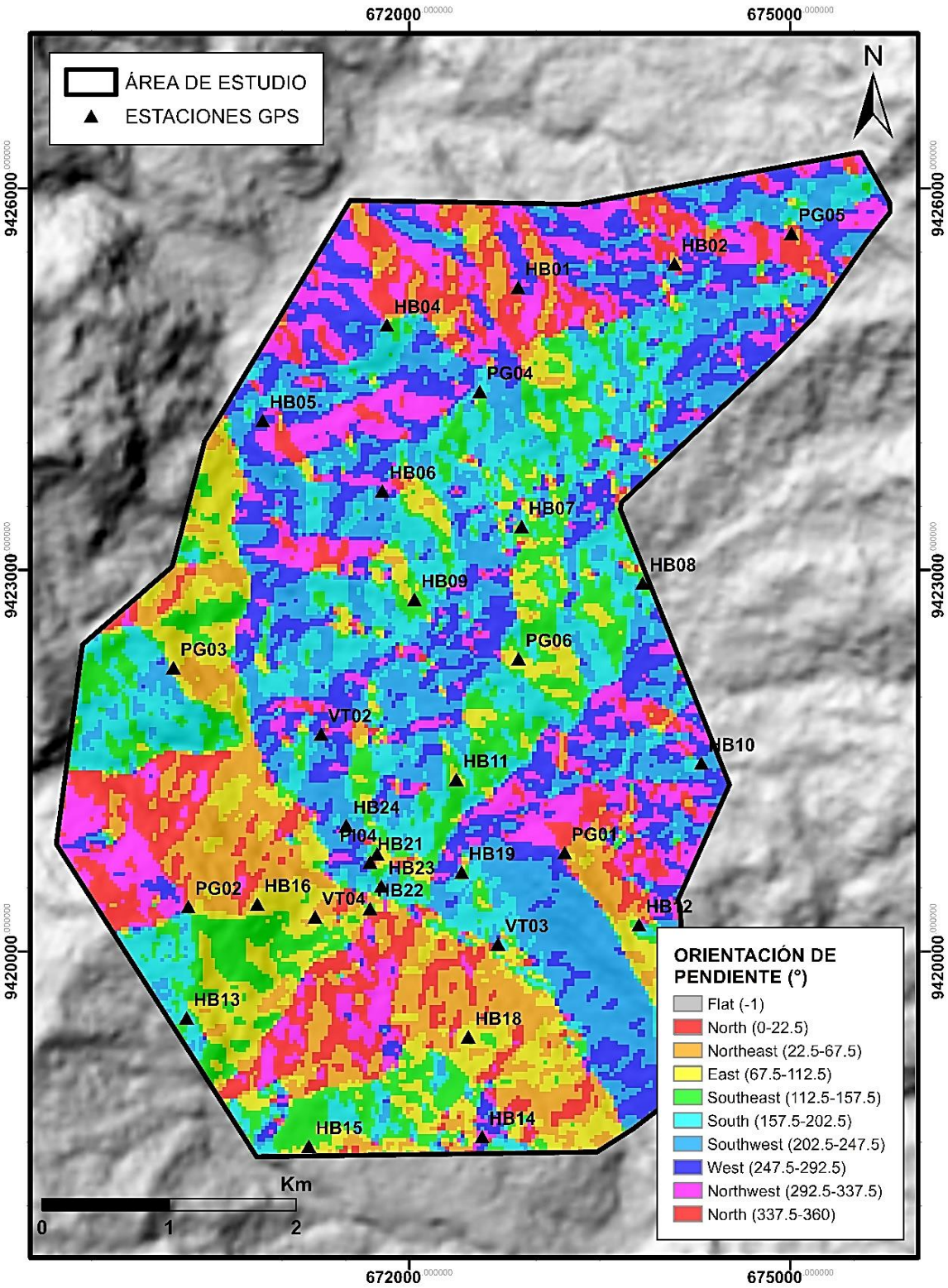
Apéndice A. Mapa de elevaciones de la zona de estudio.

Apéndice B: Mapa de pendientes



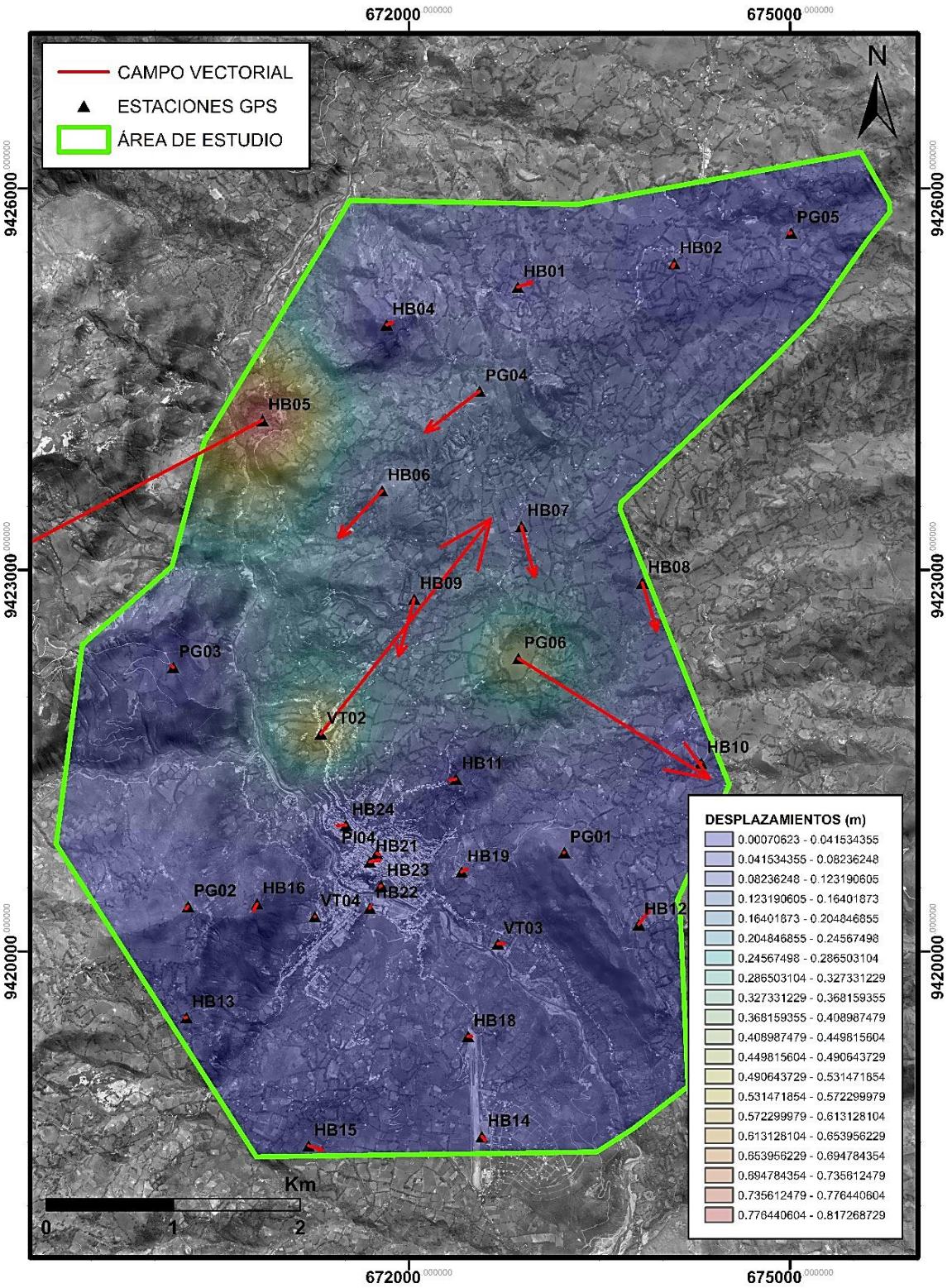
Apéndice B. Mapa de pendientes en grados sexagesimales de la zona de estudio.

Apéndice C: Mapa de Orientación de pendientes



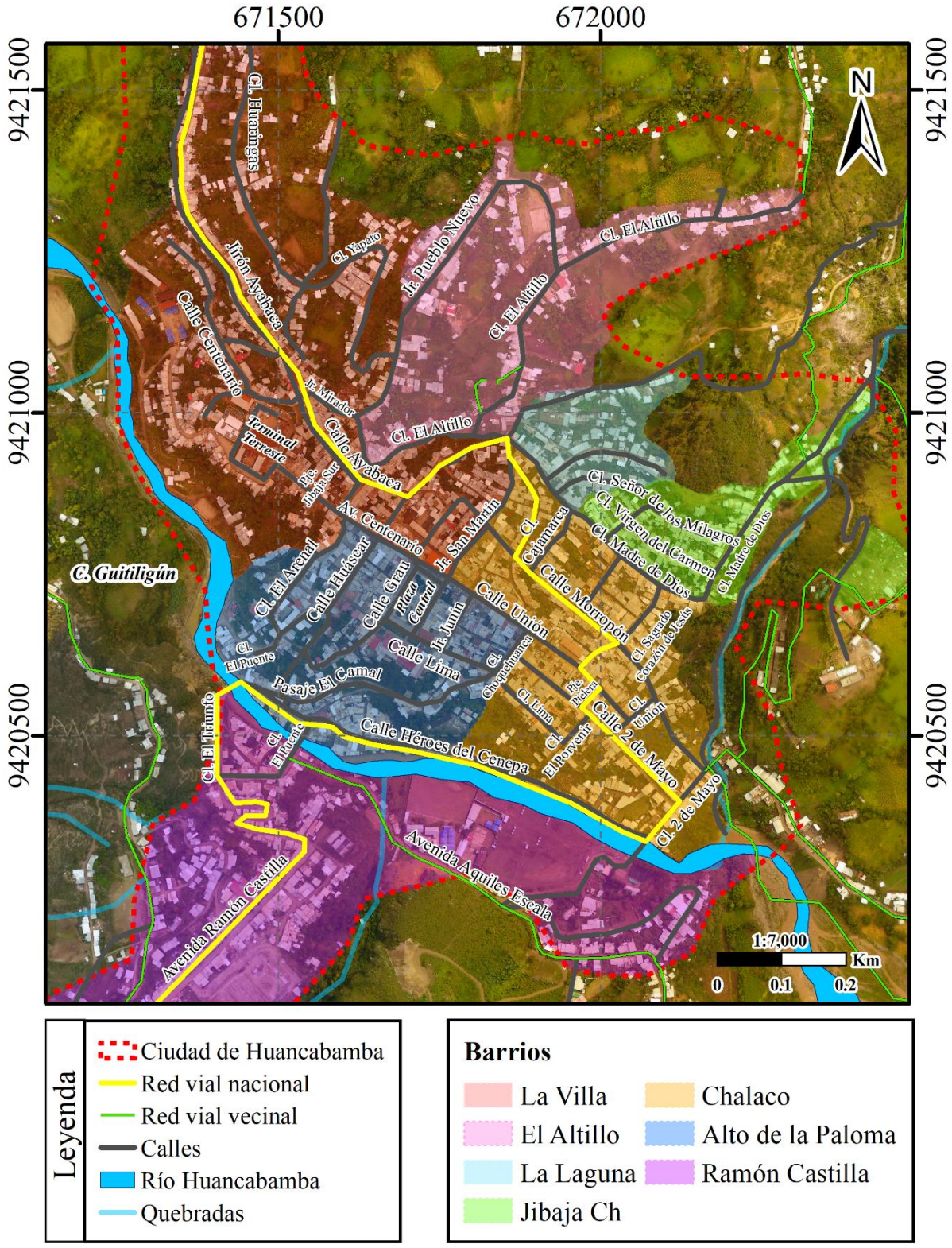
Apéndice C. Mapa de orientación de pendientes de la zona de estudio.

Apéndice D: Estudio Geodésico



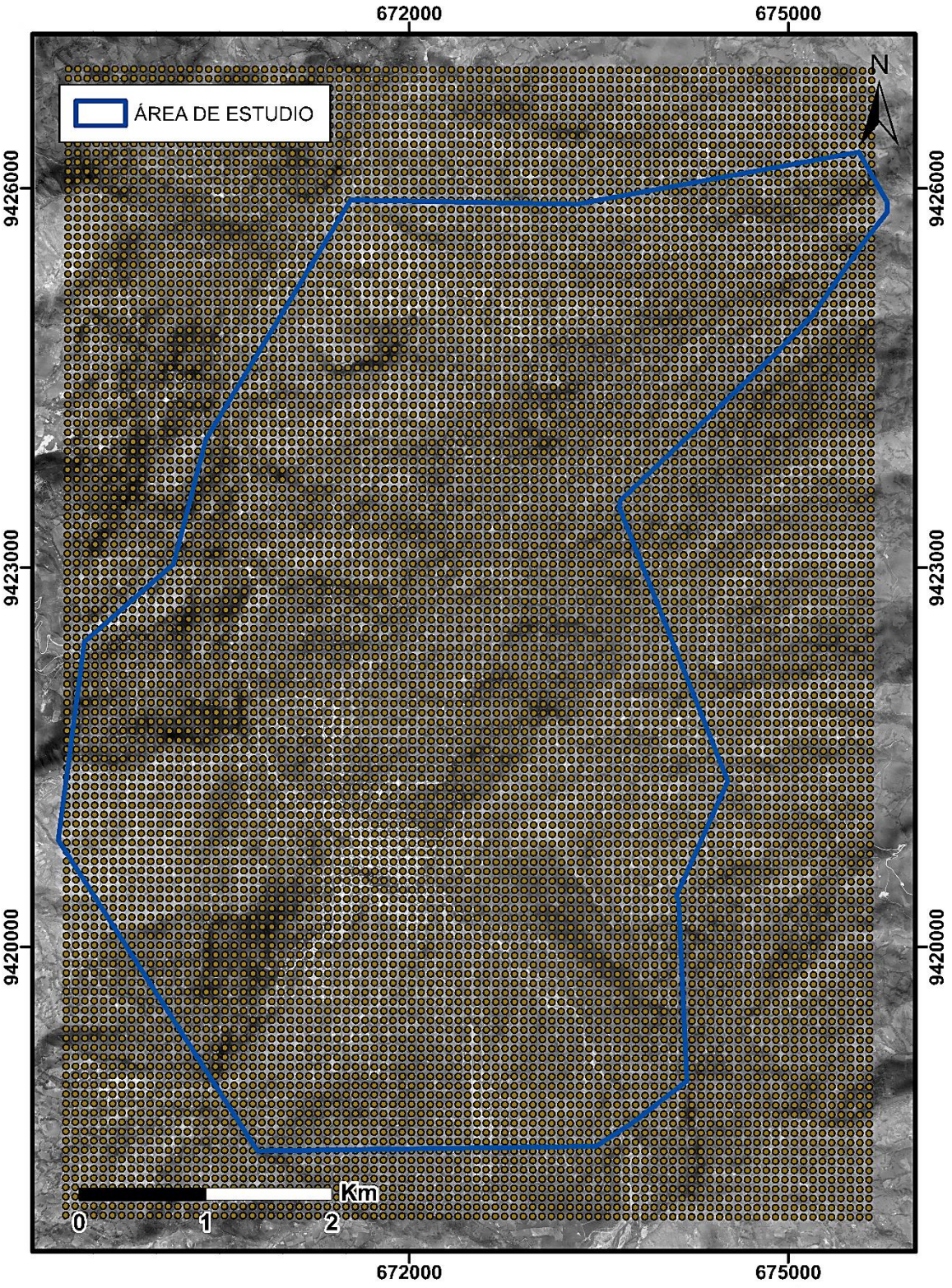
Apéndice D. Mapa de desplazamientos resultantes obtenido por interpolación IDW de resultados de estudio GPS. Los vectores de color rojo representan las direcciones de movimientos de las deformaciones superficiales registrados por las estaciones GPS en 2017 y su tamaño representa la magnitud en mm de dichos desplazamientos.

Apéndice E: Mapa urbano de la ciudad de Huancabamba



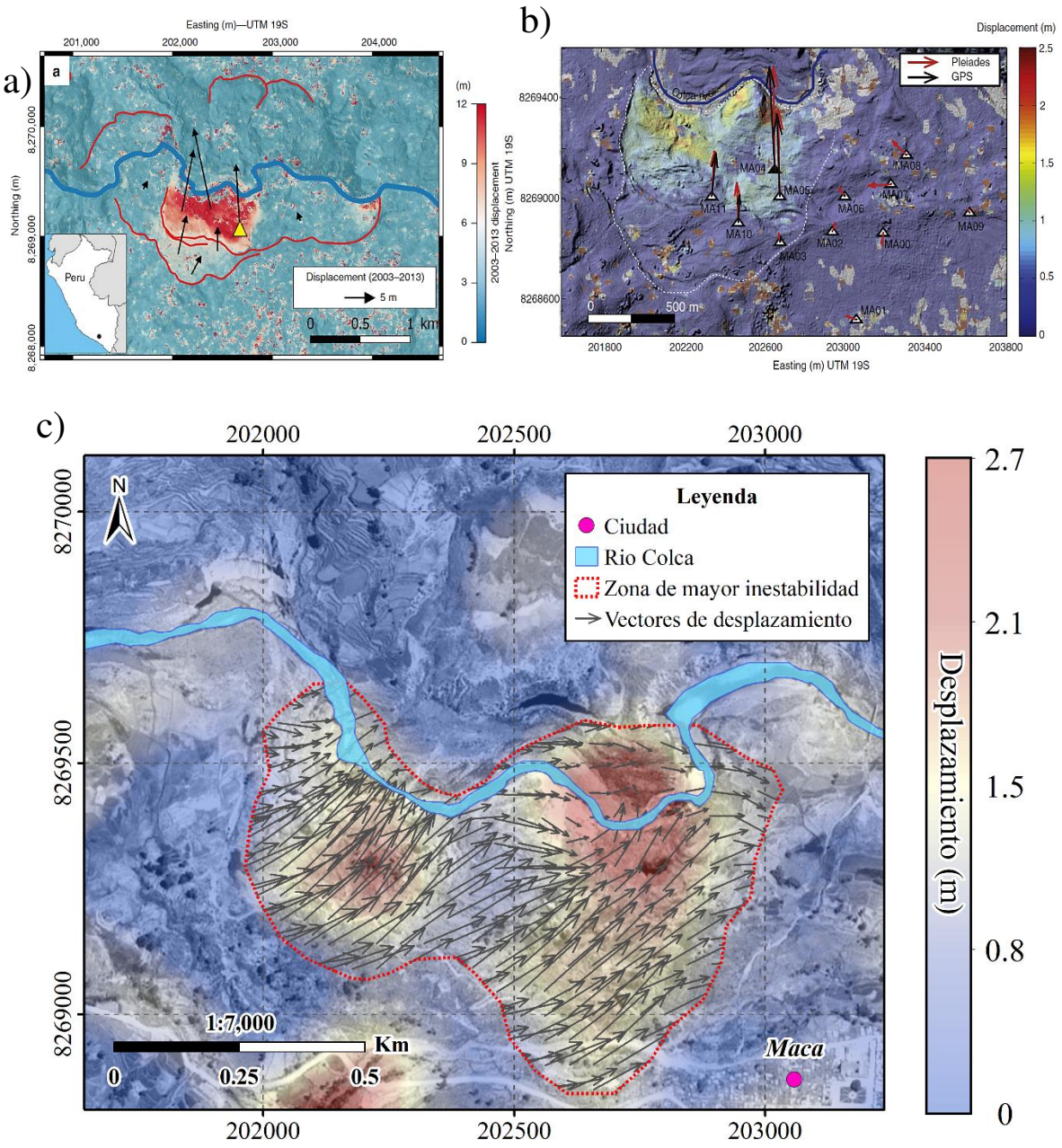
Apéndice E. Mapa urbano de la ciudad de Huancabamba.

Apéndice F: Malla de puntos



Apéndice F. Malla de puntos distribuida en toda la extensión del área de estudio.

Apéndice G: Comparación de resultados de Maca



Apéndice G. Desplazamiento acumulado de deslizamiento de tierra en las cercanías de la ciudad de Maca entre a) 2003 y 2013, llegando a una tasa máxima de desplazamiento de 12 m. (Bontemps et al., 2020). b) marzo y julio de 2013 , con tasa máxima de 2.5 m (Lacroix et al., 2015) c) 5 de diciembre del 2015 y 7 de enero del 2020, con tasa máxima de desplazamiento de 2.7 m, estimado en los ensayos previos a las pruebas de correlación subpíxel de la presente investigación.

Apéndice H: Tabla de sismos

Fecha	Nombre	Ubicación		Magnitud (Mw)	Profundidad (Km)	Distancia aprox. al área de estudio (Km)
		Latitud	Longitud			
19/07/2017	S1	-6.0752	-76.8929	4.7	64	298
11/08/2017	S2	-5.2372	-80.9377	5.0	43	165
24/08/2017	S3	-6.3469	-80.6988	4.6	10	186
26/09/2017	S4	-5.8816	-77.3785	4.8	10	241
6/10/2017	S5	-4.2813	-80.7921	4.9	35	181
4/11/2017	S6	-4.5055	-77.8678	4.5	45	193
17/11/2017	S7	-7.0553	-80.6116	4.9	35	240
18/11/2017	S8A	-2.9657	-79.707	5.5	35	252
18/11/2017	S8B	-4.1696	-80.4735	4.4	45	162
19/11/2017	S9	-4.1664	-80.6543	4.8	41	177
3/12/2017	S10	-0.47	-80.3101	6.1	17	530
7/12/2017	S11	-4.0919	-80.1753	4.8	69	149
17/12/2017	S12	-2.9167	-78.7774	4.4	108	265
22/12/2017	S13	-5.3848	-80.5677	4.9	10	127
26/12/2017	S14A	-3.1476	-80.8605	4.7	9	278
26/12/2017	S14B	-5.7259	-79.4438	4.7	81	54
22/01/2018	S15	-7.7542	-78.832	4.4	125	287
23/01/2018	S16	-3.9586	-80.6661	4.8	45	194
16/02/2018	S17A	-5.7796	-81.0561	4.9	25	187
16/02/2018	S17B	-5.891	-80.9604	5.0	25	182
27/02/2018	S18A	-2.8891	-79.7755	4.9	3	261
27/02/2018	S18B	-2.8025	-79.7882	5.0	10	270
3/03/2018	S19	-2.839	-79.7387	4.7	4	266
4/03/2018	S20	-5.7558	-80.9264	4.9	30	173
10/03/2018	S21	-4.8383	-81.3153	4.4	11	211
23/03/2018	S22	-4.83	-77.562	4.6	62	215
6/05/2018	S23	-6.5537	-81.1652	4.7	10	240
25/05/2018	S24A	-6.3365	-80.6526	4.6	35	181
25/05/2018	S24B	-6.6035	-80.61	4.9	33	200
9/07/2018	S25	-2.6849	-79.8533	4.9	50	288
11/07/2018	S26	-3.6496	-77.4982	4.9	79	280
16/07/2018	S27	-2.9748	-78.4639	4.9	89	274
17/07/2018	S28	-5.0594	-77.3372	4.9	43	235
7/09/2018	S29	-2.2532	-78.7903	6.2	110	330
8/09/2018	S30	-4.3674	-81.5144	5.1	10	248
2/10/2018	S31	-6.5686	-80.735	4.9	29	204
10/10/2018	S32A	-5.6057	-81.0733	4.8	34	183
10/10/2018	S32B	-6.5578	-81.166	4.9	44	160
10/10/2018	S32C	-6.3183	-80.4035	4.9	38	240

20/10/2018	S33	-5.1878	-77.091	4.7	105	263
29/10/2018	S34	-3.6957	-80.3208	4.9	58	194
3/01/2019	S35	-5.6193	-76.9012	5.2	44	285
5/02/2019	S36	-2.7818	-78.5671	5.1	86	288
9/02/2019	S37	-7.1054	-80.7281	4.6	35	250
14/02/2019	S38	-3.1854	-80.486	5.0	47	253
22/02/2019	S39	-2.1862	-77.0505	7.5	145	430
7/03/2019	S40	-6.3404	-79.2379	4.9	41	125
20/03/2019	S41	-2.7612	-77.3293	5.1	32	360
31/03/2019	S42	-1.9446	-80.8101	6.2	18	390
17/04/2019	S43	-5.0706	-78.1327	5.1	49	147
22/04/2019	S44	-3.2798	-80.4387	5.1	38	240
29/04/2019	S45	-3.8694	-80.3488	4.5	71	180
2/05/2019	S46	-5.2425	-77.2531	4.9	32	240
26/05/2019	S47	-5.8119	-75.2697	8.0	123	470

Apéndice H. Tabla de los principales sismos registrados en todas las extensiones temporales de las pruebas NQ1 y NP12. Los sismos de magnitudes Mw mayores a 4.4 grados, se estimaron en un radio de 300 Km, mientras que los sismos de magnitudes Mw mayores a 6.0, se registraron en un radio de 600 Km, tomando como centro a la ciudad de Huancabamba. Fuentes: IGP e IRIS.