



FACULTAD DE GEOGRAFÍA E HISTORIA

MÁSTER OFICIAL EN PLANIFICACIÓN TERRITORIAL Y GESTIÓN AMBIENTAL

TRABAJO DE FIN DE MASTER



**ANÁLISIS GEOMORFOLÓGICO-HISTÓRICO DEL VALLE DE SAN
RAFAEL – CUENCA DEL RÍO CASMA, PERÚ**

Autor: César Abad Pérez

Tutor: Dr. Joaquim Farguell Pérez

Barcelona, agosto de 2019

Agradecimientos

Al Dr. Iván Ghezzi Solís por sus orientaciones, y por permitirme acceder a información del Proyecto Chankillo.

RESUMEN

El río Casma es un río de régimen torrencial que presenta un patrón trezado en constante evolución, relacionada principalmente por crecidas relacionadas con el Fenómeno El Niño. Entre los años 1966 y 2017 se produjeron varias inundaciones que han modificado el cauce; sin embargo, las modificaciones más significativas están relacionadas con la canalización del río a partir del año 2011.

Existe una fuerte presión por la ampliación agrícola, lo que ha dado como resultado la reducción de superficie de bosques, así como ocupación agrícola dentro de la denominada faja marginal del río, la misma que debería limitar la actividad.

En general, se requiere mejorar la gestión de la zona de la ribera, con la finalidad de su restauración ecológica.

Contenido

1.	Introducción	1
1.1.	Formulación del problema y justificación	1
1.2.	Objetivos	6
1.2.1.	Objetivo general	6
1.2.2.	Objetivos específicos.....	6
1.3.	Hipótesis.....	6
2.	Marco teórico y conceptual	8
2.1.	Las inundaciones en el Perú	8
2.2.	El Fenómeno El Niño y su impacto en la Costa Peruana	8
2.3.	La dinámica temporal del Fenómeno El Niño durante el cuaternario	11
2.4.	Los métodos para la generación de información de peligros y la necesidad de plantearnos alternativas metodológicas	13
2.4.1.	Métodos hidrológico-hidráulicos	13
2.4.2.	El método geomorfológico-histórico	14
2.5.	Nuevos enfoques en la gestión de planicies de inundación	14
2.6.	El contexto institucional y normativo para la protección frente a inundaciones en el Perú	15
3.	Ámbito de estudio.....	18
3.1.	Ubicación.....	18
3.2.	Geología	19
3.3.	Geomorfología	20
3.4.	Clima e hidrología.....	31
3.5.	Uso del suelo y características socioeconómicas.....	39
3.6.	La ocupación prehispánica del Valle San Rafael.....	39
4.	Metodología.....	42
4.1.	Materiales y equipos	43
4.2.	Delimitación del área de estudio e identificación del medio fluvial y torrencial.....	45
4.2.1.	Procesamiento de información LiDAR.....	46
4.2.2.	Generación de información morfométrica	46
4.2.3.	Generación de componentes principales.....	48
4.2.4.	Generación automática de cauces	51
4.2.5.	Delimitación del medio fluvial.....	52

4.3.	Trabajo de campo.....	54
4.3.1.	Entrevistas y mapeo participativo de inundaciones históricas.....	55
4.4.	Método aplicado para el análisis geomorfológico-histórico en el medio fluvial	63
4.4.1.	Análisis histórico.....	63
4.4.2.	Análisis geomorfológico	67
4.4.3.	Análisis geomorfológico-histórico.....	69
4.5.	Análisis de instrumentos y medidas de gestión	69
5.	Resultados y discusión	70
5.1.	Las inundaciones históricas.....	70
5.2.	Análisis geomorfológico	77
5.3.	Análisis geomorfológico-histórico.....	79
5.4.	Medidas de gestión implementadas.....	81
6.	Conclusiones y recomendaciones	83
6.1.	Conclusiones.....	83
6.2.	Recomendaciones	83
7.	Referencias bibliográficas	85
8.	Anexos.....	87

LISTA DE FIGURAS

- FIGURA 1. ANOMALÍAS DE TEMPERATURA Y PRECIPITACIÓN POR TELECONEXIONES ENTRE DICIEMBRE Y ENERO
- FIGURA 2. EVENTOS EL NIÑO EN LOS ÚLTIMOS 10000 AÑOS
- FIGURA 3. EVENTOS “EL NIÑO” EVIDENCIADOS A PARTIR DE LOS REGISTROS ARQUEOLÓGICOS Y POSIBLES INTENSIDADES DE LOS EVENTOS, RESPECTIVAMENTE
- FIGURA 4. MAPA DE UBICACIÓN
- FIGURA 5. CORTE TRANSVERSAL QUE MUESTRA LOS CONJUNTOS NATURALES
- FIGURA 6. MAPA GEOMORFOLÓGICO
- FIGURA 7. TEMPERATURA MEDIA MENSUAL
- FIGURA 8. DIRECCIONES PREDOMINANTES DE LOS VIENTOS
- FIGURA 9. PERFIL LONGITUDINAL DEL RÍO CASMA
- FIGURA 10. BALANCE HÍDRICO GENERAL DE CASMA
- FIGURA 11. ANOMALÍAS DE PRECIPITACIÓN DURANTE LOS ENSO 1982/1983, 1997/1998 Y 2017
- FIGURA 12. PERIODOS CULTURALES Y SITIOS ARQUEOLÓGICOS PRINCIPALES DEL VALLE DE CASMA
- FIGURA 13. SITIOS ARQUEOLÓGICOS DELIMITADOS
- FIGURA 14. PROCESO METODOLÓGICO
- FIGURA 15. MAPA DE PENDIENTES
- FIGURA 16. MAPA DE ORIENTACIONES
- FIGURA 17. DETALLE DE COMPOSICIÓN RGB DE COMPONENTES PRINCIPALES A PARTIR DE PARÁMETROS MORFOMÉTRICOS
- FIGURA 18. COMPOSICIÓN RGB DE COMPONENTES PRINCIPALES
- FIGURA 19. DETALLE DE LA RED DE DRENAJE GENERADA DE MANERA SEMIAUTOMÁTICA
- FIGURA 20. DELIMITACIÓN DEL MEDIO FLUVIAL Y TORRENCIAL
- FIGURA 21. RECORRIDO DE CAMPO
- FIGURA 22. ORTOFOTO
- FIGURA 23. MODELO DE ELEVACIONES RELATIVAS SOBRE LA SUPERFICIE DE AGUA
- FIGURA 24. MAPEO EVOLUTIVO EN TRAMO SELECCIONADO
- FIGURA 25. FRECUENCIA DE INUNDACIONES ENTRE LOS AÑOS 1966 Y 2017

FIGURA 26. ANÁLISIS DEL CAUCE PARA EL AÑO 1966

FIGURA 27. ANÁLISIS DEL CAUCE PARA EL AÑO 2017

FIGURA 28. MAPA DE COBERTURA Y USO ACTUAL DE LA TIERRA 2019

FIGURA 29. MAPA DE COBERTURA Y USO DE LA TIERRA 1966

FIGURA 30. MAPA GEOMORFOLÓGICO

FIGURA 31. PELIGROS POR INUNDACIONES

FIGURA 32. MEDIDAS DE GESTIÓN IMPLEMENTADAS

LISTA DE TABLAS

TABLA 1. CRITERIOS PARA LA DEFINICIÓN DE NIVELES DE PELIGRO POR INUNDACIONES.

TABLA 2. DAÑOS SECTORIALES PARA LOS FEN MÁS RECIENTES

TABLA 3. REGISTRO DE DESCARGAS MÁXIMAS ANUALES (MEDIAS DIARIAS MÁXIMAS) DEL RÍO
CASMA

TABLA 4. FOTOGRAFÍAS AÉREAS E IMÁGENES DE SATÉLITE UTILIZADAS.

TABLA 5. FUENTES DE INFORMACIÓN USADAS PARA EL MAPEO

TABLA 6. PRINCIPALES INUNDACIONES HISTÓRICAS ENTRE 1961 Y 2017

1. Introducción

El Perú se encuentra actualmente en proceso de reconstrucción después de los desastres ocurridos a inicios del año 2017 ligados al Fenómeno El Niño. Este proceso está plagado de debilidades, debido al desconocimiento de la dinámica geomorfológica, que viene siendo alterada por intervenciones territoriales mal focalizadas y que, en muchos casos, tienden a incrementar el peligro, repitiéndose los errores de procesos de reconstrucción del pasado. Al nivel de las instituciones públicas oficiales existe un enorme vacío de información y debilidades metodológicas que tienden a subestimar o sobreestimar el peligro. En este contexto, se plantea el uso del método histórico-geomorfológico para delimitar el límite de la ribera del río, así como estimar el peligro por inundaciones.

1.1. Formulación del problema y justificación

El Fenómeno El Niño Costero ha dejado grandes pérdidas a la economía peruana, con gran afectación en el norte del Perú; uno de los departamentos del norte del Perú es el departamento de Ancash, donde también hubo afectación a vidas humanas, centros poblados e infraestructura agrícola. En el mes de abril del año 2017 se promulgó la Ley de Reconstrucción con Cambios (Congreso de la República, 2017). En este documento se declara de prioridad la implementación y ejecución del “plan integral para la rehabilitación, reposición, reconstrucción y construcción de la infraestructura de uso público de calidad incluyendo salud, educación, programas de vivienda de interés social y reactivación económica de los sectores productivos, con enfoque de gestión del riesgo de desastres, que incluya intervenciones que en conjunto tienen alto impacto económico, social y ambiental, como consecuencia de acciones que califiquen como nivel de emergencia 4 y 5 en las zonas de riesgo alto y muy alto de conformidad con la legislación sobre la materia”. En esta norma se designa al Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres - CENEPRED como la entidad encargada de evaluación de riesgos, con la información proporcionada

por el Ministerio del Ambiente- MINAM, el Instituto Geofísico del Perú – IGP, el Instituto Geológico Minero y Metalúrgico – INGEMMET y la Autoridad Nacional del Agua – ANA. En base a esta información, según esta norma, se tomarán decisiones respecto al proceso de reconstrucción.

Lamentablemente, la información proporcionada por las instituciones mencionadas no está siendo usada en el proceso de reconstrucción. Las coordinaciones para la implementación de la nueva infraestructura la realizan las municipalidades distritales y provinciales (el nivel local), en base a sus propias estimaciones técnicas; las mismas que, lamentablemente, no se basan en estudios que tengan en cuenta las dinámicas del relieve. Una de las razones más preocupantes es que el Perú no cuenta con mapas de peligros y riesgos con la calidad mínima suficiente, ni siquiera para que permita al funcionario público tener una primera aproximación para tomar algunas decisiones respecto a la reconstrucción. Esto puede ser sorprendente debido a la inversión que demanda tener en funcionamiento a las instituciones mencionadas (MINAM, INGEMMET, ANA, etc.), pero es una realidad que debe ponerse en evidencia.

El Perú solo cuenta con series hidrológicas de no más de 70 años, mucho menos con identificación de paleo-inundaciones. Tampoco con registros especiales de las inundaciones más recientes. La Agencia Espacial del Perú – CONIDA, solo realizó algunos mapas de zonas inundadas en el año 2017 en sectores puntuales del país. Adicionalmente, la entidad encargada de las estimaciones de riesgos, CENEPRED, cuenta con un manual de estimación de riesgos relacionados con inundaciones fluviales (CENEPRED, 2014), el mismo que propone una metodología muy básica y poco técnica para estimar el peligro por inundaciones. La metodología establece que cada a cada rango de pendiente de terreno le corresponde un nivel de peligro de inundación. Tenemos:

TABLA 1. CRITERIOS PARA LA DEFINICIÓN DE NIVELES DE PELIGRO POR INUNDACIONES. FUENTE: CENEPRED, 2014

NIVEL DE PELIGRO	RANGO DE PENDIENTE
Muy alto	Mayor a 50°
Alto	35° a 50°
Medio	20° a 35°
Bajo	5° a 20°

Esta propuesta es bastante contradictoria con lo que realmente ocurre, pues muchas inundaciones se presentan en zonas con pendientes relativamente bajas. Lo propuesto simplifica demasiado los mecanismos de ocurrencia de inundaciones.

A pesar de lo mostrado, existen otras instituciones públicas que generan información de zonas inundables con metodologías diferentes, y con alguna mejor aproximación. Tenemos al Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (INGEMMET), al Ministerio del Ambiente (MINAM) y a la Autoridad Nacional del Agua (ANA).

Para el caso de INGGEMMET, esta institución encargada de la evaluación de peligros geológicos e inundaciones, elaboró un estudio a la escala 1/25000 de la región Ancash (Zavala Carrión, Luque Poma, Valderrama Murillo, Barrantes Huamán, & Pari Pinto, 2009), que es la región donde se seleccionó el área de estudio del presente trabajo. Este mapa fue generado a partir de modelamiento cartográfico basado en la superposición lineal ponderada de pendientes y unidades geomorfológicas. Una de las limitaciones para el uso de esta información por la gestión pública es, que prácticamente todos los depósitos fluviales, depósitos aluviales y muchos sectores de colinas tienen algún nivel de peligro. En el caso de los depósitos fluviales, todos son de peligro muy alto. En

el caso de depósitos aluviales, predomina el peligro alto. En algunas colinas se tiene peligro bajo. En la realidad, en los depósitos aluviales no ocurren inundaciones fluviales, solo flujos de detritos, muchos menos en las colinas. INGEMMET es una institución científica asociada al Ministerio de Energía y Minas, y cuenta con información de este tipo a nivel nacional. Esta es la información más cercana a la realidad con que se cuenta en la zona.

El Ministerio del Ambiente publicó el año 2015 el Mapa de Susceptibilidad Física (MINAM, 2015) a la escala 1/250000, información muy genérica por la escala, que brinda resultados parecidos (o de menor detalle) a los de INGEMMET, pues usa como insumo la misma información.

Este es el contexto institucional general de la información pública para la gestión del riesgo. Una conclusión preliminar es que existe muy poca información útil. La metodología de CENEPRED es bastante errónea y de muy bajo nivel técnico. Los mapas de INGEMMET, los más ampliamente usados, brindan información muy gruesa que no está basada en la evidencia ni en el modelamiento hidrológico. Estos mapas tienen muy poco uso por los gobiernos locales debido a que muchos funcionarios consideran que el nivel de peligro alto y muy alto son están sobreestimados, lo que no permite tomar decisiones. La información de fajas marginales está bastante subestimada. En el año 2017 la Municipalidad provincial de Casma, la que administra este territorio, formuló el Plan de Acondicionamiento Territorial (Municipalidad Provincial de Casma, 2017a), el mismo que fue revisado y validado por el Ministerio de Vivienda, que en un contexto de reconstrucción, viene repitiendo muchos errores del pasado al identificar zonas de riesgo.

Una de las conclusiones de este breve diagnóstico es que existe una gran precariedad en la información sobre inundaciones para llevar adecuadamente un proceso de reconstrucción. Algo parecido (o peor) ocurre con el caso de flujos de detritos, que en el desarrollo del TFM será desarrollado. Se requiere entonces contar con información mínima para la toma de decisiones.

En este contexto surgen las siguientes preguntas que ayudarán a orientar la investigación:

- ¿Hay información confiable o no para el proceso de reconstrucción?
- ¿Cuál es la información mínima preliminar con que deberíamos contar para tener cierta confiabilidad en la focalización de la reconstrucción?
- ¿Es posible generar información mínima preliminar para la toma de decisiones en base a la al método geomorfológico-histórico?

El presente trabajo usará como metodología el método geomorfológico-histórico, basado en la Guía Metodológica para el Desarrollo del Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables (Martínez & Fernández, 2011). Tal como este documento menciona “Tradicionalmente, la definición de zonas inundables ha sido considerada una labor de técnicos especialistas en modelización hidrológico-hidráulica. Las últimas experiencias en la materia, sin embargo, muestran la necesidad de combinar dichas tareas con el análisis geomorfológico-histórico de cauces y llanuras, en una labor multidisciplinaria especialmente importante cuando se trata de definir el Dominio Público Hidráulico o las zonas inundables de alta probabilidad “. En el caso peruano, a falta de una regulación clara y debido a la escasez de información, se propone usar la metodología geomorfológica-histórica como un primer filtro que permitirá identificar de manera preliminar zonas mitigables y no mitigables, lo que garantizará una mejor focalización de proyectos. Posteriormente a esto se plantea el uso del modelamiento hidrológico-hidráulico, el mismo que no será desarrollado en el presente trabajo.

Como ámbito de estudio se seleccionó un tramo del Valle San Rafael, en la cuenca del río Casma, en el departamento de Ancash, provincia de Cama. Se seleccionó Casma por ser una de las zonas más afectadas por inundaciones y flujos de detritos relacionados con el Fenómeno El Niño, existiendo también varios puntos críticos por inundaciones (Autoridad Nacional del Agua, 2019), siendo también considerada como zona de alta susceptibilidad a inundaciones y erosión fluvial (Zavala

Carrión et al., 2009). El tramo de río seleccionado se encuentra en una zona donde existe evidencia arqueológica estudiada por diversos proyectos arqueológicos en ambas márgenes de río, no hay muchos lugares en el Perú con información con tantos estudios arqueológicos en un ámbito relativamente pequeño; a su vez, se cuenta con información de alta precisión como imágenes LiDAR. Lo mencionado permitirá poner a prueba el método geomorfológico-histórico, y su potencial para analizar la dinámica fluvial, inundabilidad, y generar mapas de peligros.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Realizar un análisis geomorfológico-histórico en un tramo del Valle San Rafael (cuenca del río Casma), provincia de Casma.

1.2.2. Objetivos específicos

- Realizar un estudio evolutivo del medio fluvial en base a las evidencias geomorfológicas de la inundabilidad de los terrenos.
- Analizar los mapas de peligros existentes, así como medidas de gestión implementadas, a la luz de los resultados obtenidos.

1.3. Hipótesis

- La evidencia geomorfológica permite conocer la historia geodinámica subreciente, la que permite predecir con una aproximación razonable las áreas afectadas en los últimos eventos El Niño. Esto constituye una información mínima importante para contar con información rápida para el proceso de reconstrucción con cambios.

- Las estimaciones de peligros existentes se encuentran sobreestimadas o subestimadas para la zona de estudio, en relación a las evidencias del análisis geomorfológico-histórico.

2. Marco teórico y conceptual

Algunos de los fenómenos naturales más recurrentes y que generan más catástrofes en el Perú son las inundaciones, las mismas que, en su mayor parte, están relacionadas con el Fenómeno El Niño.

2.1. Las inundaciones en el Perú

Las inundaciones en el Perú ocurren entre los meses de noviembre y abril, meses que coinciden con el incremento de las precipitaciones. Las mayores pérdidas por inundaciones ocurren en la costa del Perú (Ojeda Couchoud, Sovero Sovero, Vargas, Pacha Vicente, & Pernas Canadell, 2015). La mayor parte de las inundaciones están relacionadas con el Fenómeno El Niño y La Niña. En la costa peruana se concentran las mayores ciudades e infraestructuras, la misma que forma parte de un desierto. Los ríos de la costa incrementan su caudal por las precipitaciones que ocurren en la sierra.

2.2. El Fenómeno El Niño y su impacto en la Costa Peruana

EL Fenómeno El Niño (FEN) es una “fluctuación climática que ocurren en el Océano Pacífico con una periodicidad de 2 a 7 años” (Dewitte et al., 2014), la misma que genera un incremento en la temperatura superficial del agua de mar, y constituye “la mayor perturbación natural en el sistema climático global” (Apéstegui, Macharé, Takahashi, Sifeddine, & Ortieb, 2015).

Esta variabilidad climática tiene una fase cálida y una fría. Durante la fase cálida la atmósfera tropical se calienta y humedece, generando intensas precipitaciones en la costa oeste de Sudamérica (SENAMHI, 2014). Los efectos climáticos son diferenciados a nivel global, tal como se puede observar en la Figura 5, existiendo condiciones cálidas, secas, secas y cálidas, etc. En el caso del Perú, en la costa oeste de Sudamérica, las condiciones climáticas generan afectación a la actividad agrícola y maricultura, siendo también afectadas muchas zonas urbanas y rurales, principalmente por las inundaciones y flujos de detritos.

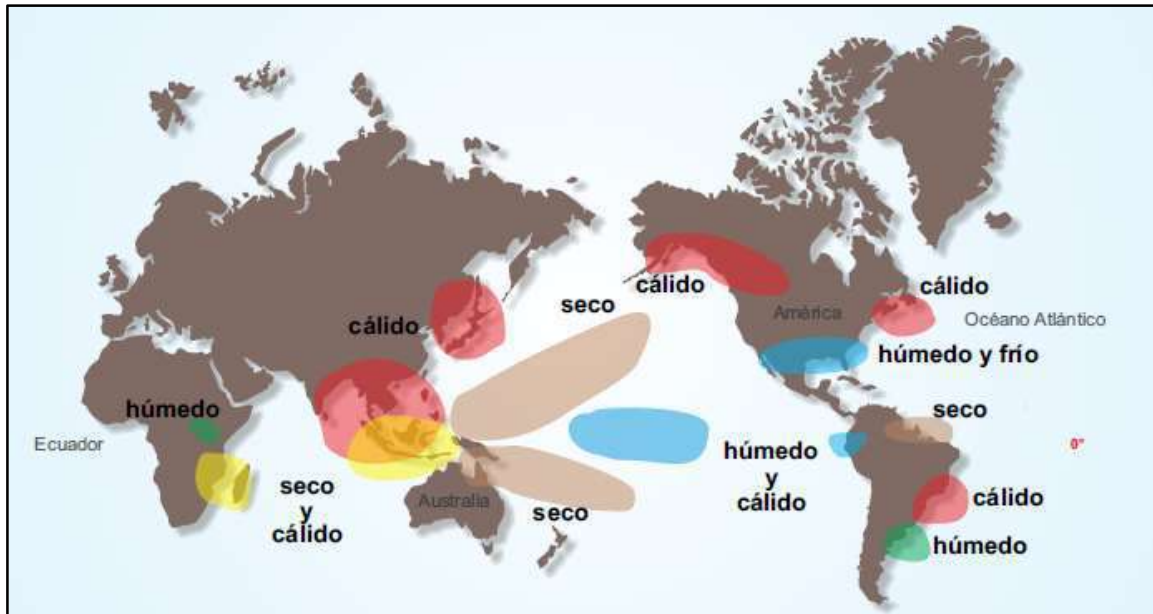


FIGURA 1. ANOMALÍAS DE TEMPERATURA Y PRECIPITACIÓN POR TELECONEXIONES ENTRE DICIEMBRE Y ENERO (ADAPTADO DE NOAA POR SENAMHI, 2014)

Según el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI, 2014), la NOAA utiliza el Índice Océano El Niño para la identificación de El Niño y La Niña lo que permite clasificar la magnitud del fenómeno. Algunos de los eventos de mayo magnitud (específicamente los de intensidad fuerte a extraordinario) durante el siglo XXI ocurrieron el año 1925, 1982-1983, 197-1998, y en el siglo XXI el del año 2017. Según la fuente ya citada, durante el FEN del año 1982-1983 se produjo un incremento de temperaturas y precipitaciones, habiéndose tenido una anomalía de precipitación de 3000 mm en la costa norte del Perú, y en la sierra sur sequía. Esto generó daños estimados en US\$ 3283 millones. En el FEN 1997-1998 ocurrieron pérdidas de US\$ 3500 millones. En el caso del año 2017, las pérdidas estimadas ascienden a entre US\$ 6000 y 9000 millones (French & Mechler, 2017). En la Tabla 2 se puede observar un resumen de los daños. Según esta tabla, a pesar de que el número de muertos ha disminuido significativamente en el último FEN con respecto

al del año 1982-1983, el número de afectados es aún significativo, así como también la infraestructura afectada (los autores se basaron en información de la Comisión Económica para América Latina y el Caribe, Banco de Desarrollo de América Latina y el Instituto de Defensa Civil), habiéndose casi triplicado la longitud de vías ente el primer FEN y el último, al igual que en el número de viviendas afectadas, colegios y centros de salud. Esto demuestra que no se está planificando adecuadamente el territorio, pues se están ocupando zonas de alto riesgo, e invirtiéndose mucho en infraestructura.

TABLA 2. DAÑOS SECTORIALES PARA LOS FEN MÁS RECIENTES. ADAPTADO DE FRENCH Y MECHLER (2017)

SECTOR AFECTADO	FEN 1982 - 1983	FEB 1997-1998	FEN 2017
Población	- 512 muertos - 1304 heridos - 1.27 millones de afectados	- 366 muertos - 1053 heridos - 531104 afectados	- 114 muertos - 414 heridos - 1.8 millones de afectados
Redes de transporte	2600 km de vías	3136 km de vías	6614 km de vías
Vivienda	- 98000 viviendas destruidas - 111000 viviendas dañadas	- 48563 viviendas destruidas - 108000 viviendas dañadas	- 41632 viviendas destruidas - 242433 viviendas dañadas
Educación	875 colegios dañados	2873 colegios dañados	2150 colegios dañados
Salud	260 centros de salud dañados	580 centros de salud dañados	726 centros de salud dañados
Total de pérdidas monetarias	3.2 billones de dólares	3.5 billones de dólares	6 a 9 billones de dólares

El FEN plantea retos muy importantes para la gestión del territorio, siendo parte importante de la dinámica natural, y siendo necesario conocer su funcionamiento para una adecuada gestión del riesgo. Según diversas fuentes analizadas por el SENAMHI (2014), solo en los últimos cinco siglos han ocurrido al menos 120 FEN, y durante el siglo XX ocurrieron al menos 25 con diferentes intensidades.

2.3. La dinámica temporal del Fenómeno El Niño durante el cuaternario

El conocimiento de la dinámica de El Niño durante el cuaternario puede permitir conocer la dinámica de El Niño en tiempos prehistóricos, y conocer su posible impacto local, lo que puede permitir buscar evidencia del impacto de estos eventos, así como contar con mejores elementos para su predicción, debido a que hasta solo se focaliza la política pública en materia de gestión de riesgos, en base a información instrumental que data recién desde la segunda década del siglo XX (SENAMHI, 2014).

El Instituto Geofísico del Perú (Apéstegui & Takahashi, 2016) realizó estudios sobre la ocurrencia del FEN durante el Holoceno (los últimos 10000 años), posterior a la última glaciación, y también de manera más detallada para los últimos 1000 años (Apéstegui et al., 2015).

Según los resultados del primer estudio, y tal como se puede observar en la Figura 2, durante el Holoceno la ocurrencia del FEN ha sido bastante variable, observándose un incremento en la intensidad de las lluvias en los últimos 2000 años (posiblemente El Niño), incremento que coincide con una migración hacia el sur de la Zona de Convergencia Intertropical. Durante el Holoceno Medio existió una menor ocurrencia del FEN. Una de las conclusiones más interesantes es que “no se puede descartar que en el pasado remoto los eventos ENSO hayan tenido un comportamiento distinto a lo que hemos visto en los siglos recientes”.

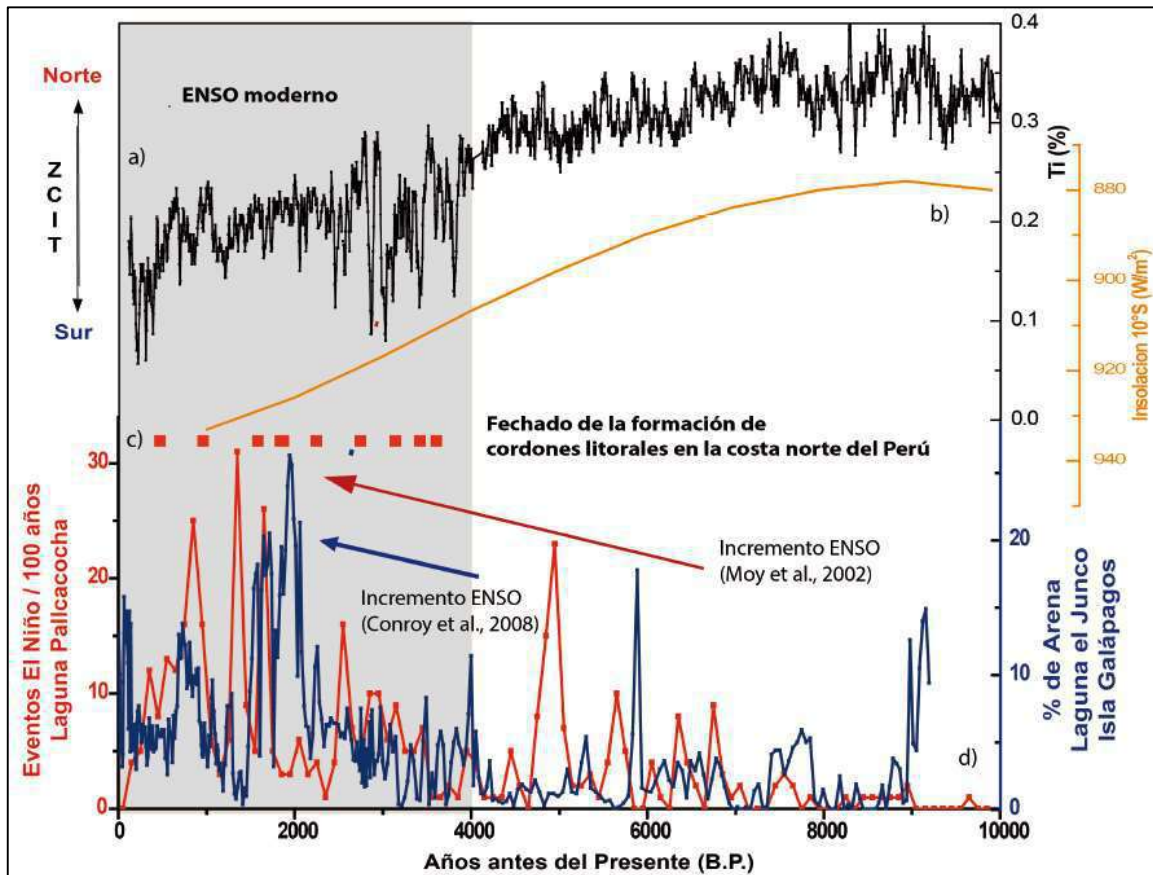


FIGURA 2. EVENTOS EL NIÑO EN LOS ÚLTIMOS 10000 AÑOS (APÉSTEGUI & TAKAHASHI, 2016)

Durante el siglo XIX se identificaron 23 FEN, cinco de ellos fueron muy fuertes. En el siglo XVIII ocurrieron cuatro muy fuertes (Figura 3). Se registraron también dos eventos fuertes en el siglo XVI y uno para el siglo XV (Apéstegui et al., 2015).

Años Niño	Intensidad	Años Niño	Intensidad	Años Niño	Intensidad
1899 - 1900	MF	1799 - 1800	M	1589	F
1896 - 1897	M	1791 - 1794	M	1685 - 1686	MF
1894	MF	1790 - 1791	MF	1578	F
1887 - 1888	F	1788	M	1551	F
1884	F	1785 - 1784	MF	1545	M
1880	M	1777 - 1778	F	1535	F
1878 - 1877	MF	1772 - 1773	M	1624	MF
1871	MF	1765	M	1522	F
1860	D	1761	F	1519 - 1518	F
1854	F	1747-1748	F	1507	M
1852	D	1737 - 1738	F		
1854-1855	M	1736 - 1735	M		
1850	D	1728	MF		
1844 - 1845	MF	1725	F		
1837	M	1720	F		
1832 - 1833	F	1718	M		
1827 - 1828	F	1713	M		
1824	F	1701	F		
1821	M				
1819	M				
1817	M				
1814	F				
1805 - 1804	M				

Años Niño	Intensidad
1596	F
1595	F
1577-1578	MF
1575	F
1568	F
1558	
1551	
1549	M
1531 - 1532	M

D	Débil
M	Modoradio
F	Fuente
MF	Muy fuerte

FIGURA 3. EVENTOS “EL NIÑO” EVIDENCIADOS A PARTIR DE LOS REGISTROS ARQUEOLÓGICOS Y POSIBLES INTENSIDADES DE LOS EVENTOS, RESPECTIVAMENTE (APÉSTEGUI ET AL., 2015)

2.4. Los métodos para la generación de información de peligros y la necesidad de plantearnos alternativas metodológicas

2.4.1. Métodos hidrológico-hidráulicos

Se basan en técnicas estadísticas a través del procesamiento de información hidroclimática. Se calculan hidrogramas para asignar una probabilidad de ocurrencia de un evento. Pueden usar métodos directos (a partir de aforos) o indirectos (modelizan el comportamiento en base a cálculos matemáticos y físicos). El análisis de máximas avenidas se calcula con la ayuda de distribuciones de probabilidad (Apacla Nalvarte, 2010).

2.4.2.El método geomorfológico-histórico

Constituye un método geográfico que estudia el funcionamiento natural de los cursos de agua y analiza la estructura de las formas de origen fluvial que permiten identificar las inundaciones sucesivas (DIREN-PACA, 2007). Se realiza a partir de diversas fuentes de información espacial, tales como fotografías aéreas, imágenes de satélite, mapas topográficos, entre otros, así como el trabajo de campo. Es de relativamente bajo costo y permite cubrir grandes espacios. Se puede complementar con los métodos hidrológico-hidráulicos.

2.5. Nuevos enfoques en la gestión de planicies de inundación

Tal como se explicó en el capítulo introductorio, las decisiones sobre la gestión de las planicies inundables se basan en gran parte en los métodos hidrológico-hidráulicos, existiendo una gran alteración de la dinámica natural de los ríos. Como sociedad no hemos logrado comprender la dinámica natural de los ríos, y hemos generados normas e instituciones que vienen generando sobrecostos al Estado y pérdidas importantes. Tal como afirman algunos expertos, “sin un buen conocimiento de la dinámica fluvial es muy difícil realizar un análisis y diagnóstico certero del estado de un río” (Ballarín Ferrer & Rodríguez Muñoz, 2013).

La casi duplicación de pérdidas estimadas en costos vistas en el capítulo 1 no se deben necesariamente a una mayor magnitud de las inundaciones y flujos de detritos, sino a una mayor artificialización del medio natural que no respeta lo que debe parecer obvio. El modelo económico primario-exportador del Perú ha dado como resultado una dinámica de ocupación basada en el desconocimiento de la dinámica ambiental y la presión por la ocupación de zonas de alto riesgo. La expresión “en la últimas décadas se ha maltratado a los ríos, aumentando su deterioro ambiental y sus riesgos” (Ballarín Ferrer & Rodríguez Muñoz, 2013) aplica perfectamente al Perú.

La restauración fluvial, como medidas para lograr un sistema fluvial lo más parecido a las condiciones naturales, se hace fundamental. Esto implica la combinación de métodos de evaluación y justifica el enfoque histórico-geomorfológico (en el que profundizaremos luego), pero obliga también a un activo proceso de gestión territorial que parta de la concientización de los involucrados para lograr acuerdos para la mejor ocupación del suelo.

2.6. El contexto institucional y normativo para la protección frente a inundaciones en el Perú

En el Perú, la Ley Recursos Hídricos (Congreso de la República, 2009) establece la existencia de fajas marginales, las mismas que son “los terrenos aledaños a los cauces naturales o artificiales”. Las fajas marginales, según la norma, garantizan la protección, el uso primario del agua, el libre tránsito, la pesca, caminos de vigilancia y otros servicios. Según el Reglamento de la Ley de Recursos Hídricos (Autoridad Nacional del Agua, 2016), las fajas marginales son bienes de dominio público hidráulico y “están conformadas por las áreas inmediatas superiores a las riberas de las fuentes de agua, naturales o artificiales”; al ser de dominio público hidráulico, estas son inalienables e imprescriptibles, siendo la Autoridad Administrativa del Agua la que autoriza la ejecución de cualquier actividad o instalación en la faja marginal. Su delimitación se establece bajo los criterios establecidos por el “Reglamento para la delimitación y mantenimiento de fajas marginales en cursos fluviales y cuerpos naturales y artificiales” (Autoridad Nacional del Agua, 2016) .

A diferencia de la normativa española (Ministerio de la Presidencia, 2008), el dominio público hidráulico en el Perú está comprendido entre el nivel de la máxima crecida ordinaria y la faja marginal, que tiene un ancho variable de entre 3 y 10 metros. Sería más o menos un equivalente a la “zona de servidumbre” en la normativa española. Es importante también mencionar que en el Perú no existe el equivalente a la “zona de policía”.

Según el reglamento para la delimitación y mantenimiento de fajas marginales ya mencionado, la delimitación de la faja marginal de cauces naturales comprende dos etapas:

- a. Determinación del límite superior de la ribera
- b. Determinación del ancho de la faja marginal

En el primer caso, se establece a través de dos métodos posibles: el de modelamiento hidráulico y el de huella máxima. Para el caso de modelamiento hidráulico, se aplica usando información topográfica y caudales máximos. En el caso de zonas colindantes a terrenos agrícolas se usa un periodo de retorno de 50 años, en el caso de asentamiento poblacionales, el periodo de retorno es de 100 años. El reglamento menciona que se debe usar información estadística de al menos los últimos 20 años. Se menciona también que no se considerarán valores de caudales máximos por efectos de eventos excepcionales.

En el caso del método de huella máxima, se menciona que es un método alternativo al modelamiento hidráulico, y se especifica que “se emplea únicamente en los casos que las huellas sean claramente identificables”; para ello, el reglamento plantea la segmentación del cauce natural en tramos y secciones transversales, y definir para cada una de ellas el eje longitudinal; luego se identifica las huellas máximas para cada sección transversal.

La implementación de obras de protección de riberas toma en consideración el reglamento de delimitación y mantenimiento de las fajas marginales ya citado; en este sentido, los lineamientos para los proyectos de inversión pública de servicios de protección frente a inundaciones, se basan en estas (Ministerio de Economía y Finanzas, 2013). Las obras de infraestructura hidráulica en la faja marginal requieren la autorización de la Autoridad Administrativa del Agua, la misma que “es la que aprueba el respectivo expediente técnico y verificará su ejecución”.

Dicho todo esto, se concluye que la delimitación de las fajas marginales es fundamental para la gestión de zonas inundables en el Perú, siendo necesario que los resultados tengan buena calidad y partan de un buen conocimiento de la dinámica fluvial.

3. Ámbito de estudio

3.1. Ubicación

El área de estudio se encuentra en el departamento de Ancash, uno de los departamentos costeros del norte del Perú, y en la provincia de Casma y distrito del mismo nombre.

Se encuentra a más de 360 km de la ciudad de Lima (capital del Perú), y a 10 km de la ciudad de Casma, la capital de la provincia. Se encuentra aproximadamente a los 9° 26' de latitud sur y los 78° 12' de longitud oeste. El rango altitudinal se encuentra entre los 90 m.s.n.m. en la planicie fluvial, y aproximadamente los 1300 m.s.n.m. en el cerro Mucho Malo (ver Figura 4). EL área de estudio cuenta con una superficie total de 5154 hectáreas.

El área de estudio se encuentra en la cuenca del río Casma, y es atravesado por este río, el mismo que forma un valle donde predomina la actividad agrícola; a este valle se le denomina Valle de San Rafael. Los límites hacia el este y oeste están definidos por las divisorias de aguas de las cuencas torrenciales que se encuentran hacia ambas márgenes del río.

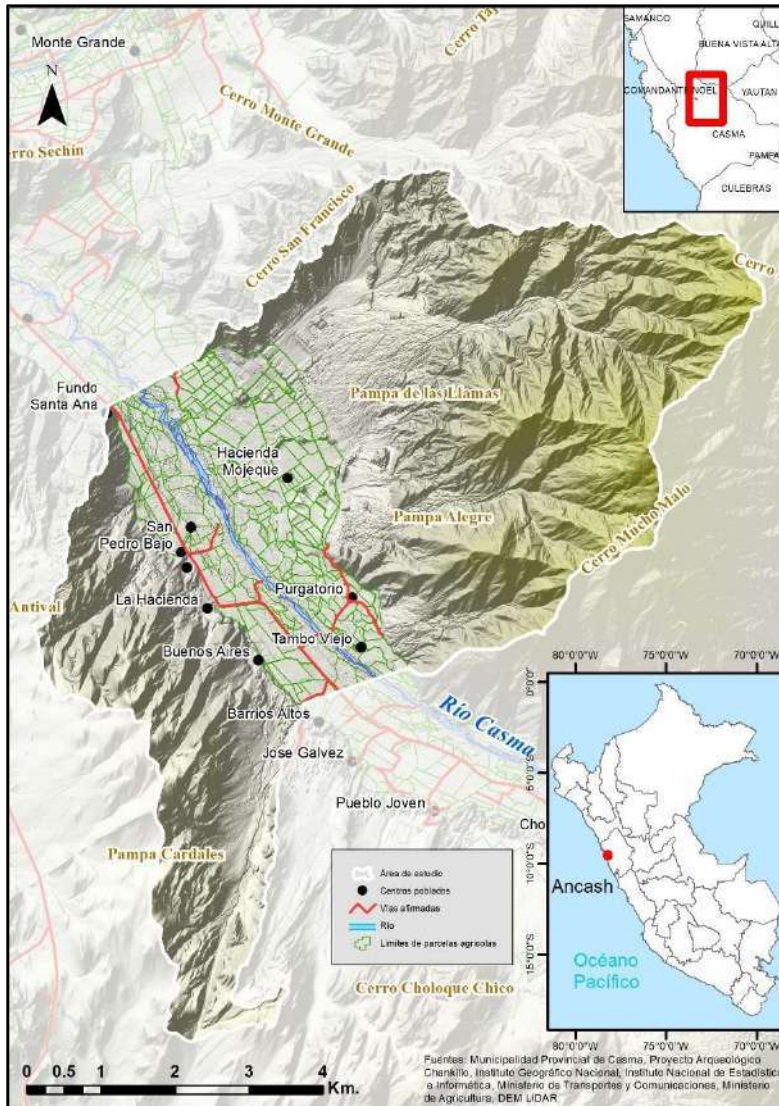


FIGURA 4. MAPA DE UBICACIÓN. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA EN BASE A INFORMACIÓN DE LA MUNICIPALIDAD PROVINCIAL DE CASMA.

3.2. Geología

Según la carta geológica del Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (Sánchez Fernández, Molina Galdos, & Gutiérrez Abanto, 1995), se pueden encontrar las siguientes unidades:

DEPÓSITOS DEL CUATERNARIO

Representados por depósitos fluviales, aluviales y eólicos del pleistoceno y del holoceno.

FORMACIÓN JUNCO

Se trata de lavas almohadilladas y flujos de lavas. Están presentes en la zona este del área de estudio, siendo parte de laderas de colinas empinadas. Afloran en el flanco sureste del cerro Mucho Malo, formando pequeñas cuencas torrenciales.

ROCAS INTRUSIVAS

Abarcan casi toda el área de estudio, formando colinas disectadas; a su vez, en gran parte del área se encuentran cubiertas por material cuaternario. Resalta por su extensión la denominada Tonalita Huaricanga II, la misma que se encuentra cubierta en gran parte por arena eólica, depósitos de glaciares y depósitos aluviales. A su vez, se encuentran cortadas por intrusivos posteriores (I. Ghezzi & Gómez, 2015) como diques de pegmatitas y diques de granito y andesitas.

Destaca también la superunidad Patap, que constituye la unidad básica más antigua del batolito de la costa (Sánchez Fernández et al., 1995) constituida principalmente por gabro y diorita. Aflora principalmente en el Cerro Mucho Malo, en elevaciones por encima de los 1000 m.s.n.m.

3.3. Geomorfología

Según la información generada por la Municipalidad Provincial de Casma para el Plan de Manejo del Observatorio Arqueoastronómico de Chankillo (Municipalidad Provincial de Casma, 2017b), en el ámbito existen formas de origen denudacional, aluvial y eólico (ver Figuras 5, 6 y Foto 1).



FOTO 1. VISTA GENERAL DEL ÁREA DE ESTUDIO QUE MUESTRA EL VALLE Y SECTORES DE COLINAS, VALLE AGRÍCOLA Y ABANICOS ALUVIALES. FOTO: CÉSAR ABAD PÉREZ/MUNICIPALIDAD PROVINCIAL DE CASMA, 2017

En términos geodinámicos, en la actualidad no hay una interacción muy directa entre las zonas de colinas y sus piedemontes, con el valle agrícola, pues los depósitos de los flujos torrenciales no llegan directamente al área de estudio. En la figura 5 se muestran los conjuntos naturales en el ámbito de estudio, o que tienen influencia la actividad geodinámica. El área de estudio está comprendida en las unidades colinas bajas y medias, glacis y abanicos aluviales y planicies fluviales con agricultura y colinas altas. En términos geodinámicos es importante considerar 3 grandes agentes que influyen en la geodinámica: los vientos del anticiclón pacífico sur, las precipitaciones extraordinarias y la variabilidad del caudal del río Casma.

En el caso del primer agente mencionado, este actúa diariamente y tiene una influencia considerable en la actividad de las cuencas torrenciales de la margen izquierda, pues la arena acarreada desde las playas que se encuentran al suroeste del área de estudio se depositan en esta zona formando grandes mantos de arena sobre las colinas, los mismos que influyen en el tiempo de infiltración de la lluvia en el suelo, existiendo una relativa estabilidad en términos de la dinámica torrencial, pero alta en términos de la dinámica de eólica. Los glacis y abanicos aluviales están constituidos en gran parte por arena, la misma que es retenida por un bosque de algarrobos, los que no permiten que exista migración de arena hacia el valle.

La unidad planicies fluviales con agricultura está influenciada en términos geodinámicos por la dinámica del río, cuyas crecidas están vinculadas por las precipitaciones en la parte media y alta de la cuenca. En el caso de las colinas altas y sus depósitos de piedemonte, su dinámica es más esporádica y está relacionada con las precipitaciones excepcionales relacionadas con el Fenómeno El Niño. A pesar de ser menos activas, sus procesos morfodinámicos pueden ser de gran magnitud, y tener gran afectación, a pesar de su escasa ocupación.

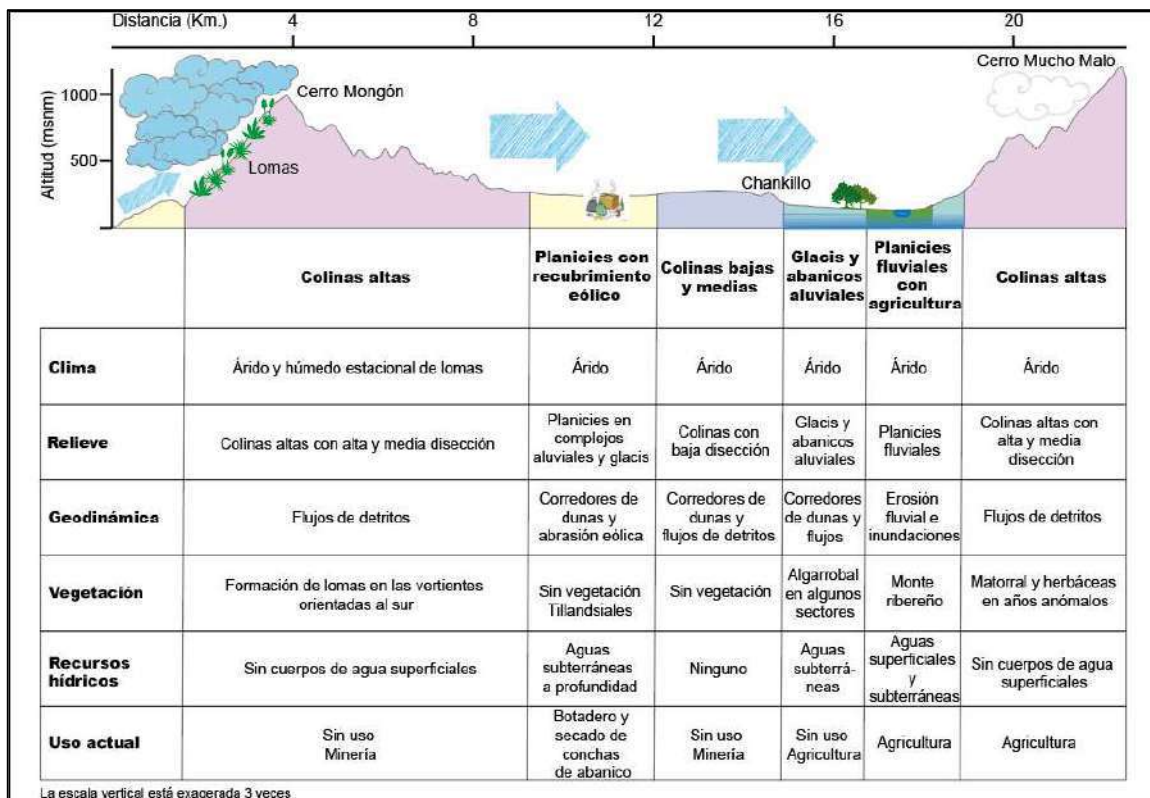


FIGURA 5. CORTE TRANSVERSAL QUE MUESTRA LOS CONJUNTOS NATURALES (MUNICIPALIDAD PROVINCIAL DE CASMA, 2017B)

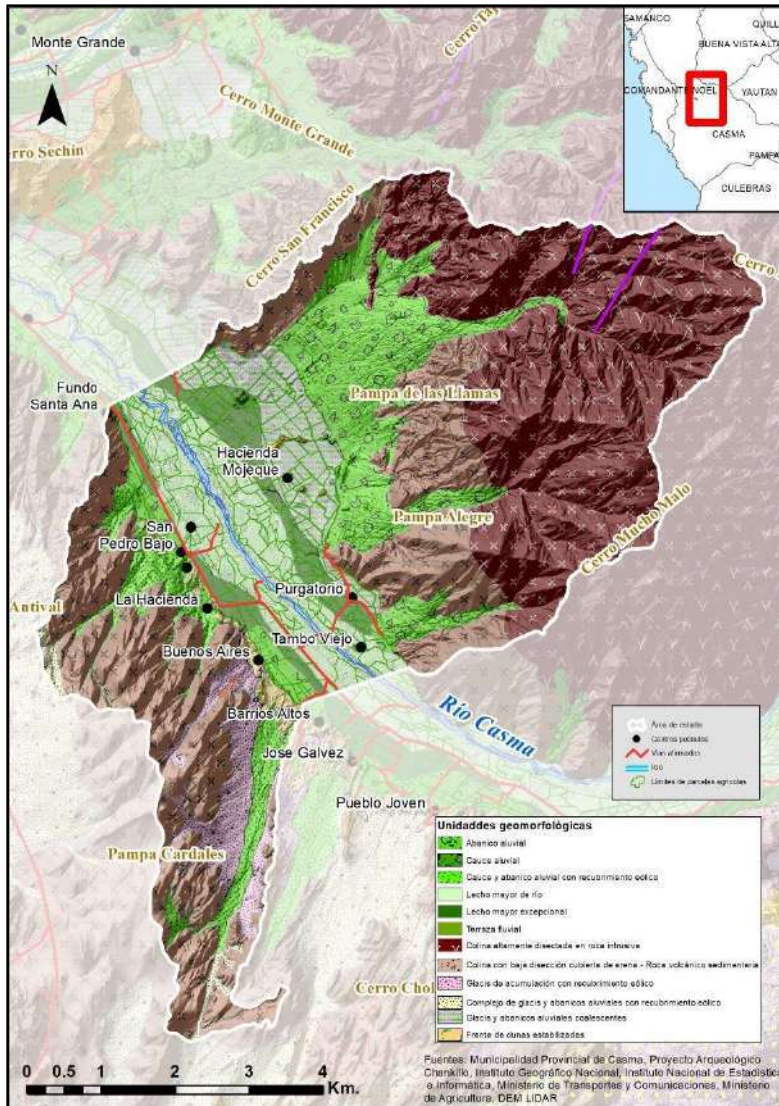


FIGURA 6. MAPA GEOMORFOLÓGICO. ADAPTACIÓN DE INFORMACIÓN DE LA MUNICIPALIDAD PROVINCIAL DE CASMA (MUNICIPALIDAD PROVINCIAL DE CASMA, 2017B).

A continuación, se hará una descripción más detallada de las unidades geomorfológicas.

FORMAS DE ORIGEN FLUVIAL

a. Cauce y abanico aluvial

Se encuentran en ambas márgenes del río, y constituyen los depósitos de piedemonte. Son formas de relieve vinculadas a los flujos de detritos o aluviones, también se le denominan huaycos (en

lengua quechua). Tienen su origen en las precipitaciones locales vinculadas a anomalías climáticas como el FEN, que acarrearán el material de los cauces y las laderas de las colinas. Son uno de los principales agentes de modificación del relieve en el área de estudio.

La mayor parte de los cauces y abanicos aluviales que se encuentran en la margen izquierda del río Casma, tienen recubrimiento de arena de espesor variables, pues se encuentran en un corredor de dunas (foto 2).



FOTO 2. ABANICOS ALUVIALES CON RECUBRIMIENTO EÓLICO EN LA MARGEN IZQUIERDA DEL RÍO CASMA, SECTOR CHANKILLO. FOTO: CÉSAR ABAD PÉREZ, 2018

Existen evidencias de actividad torrencial, sin embargo, es un poco difícil de interpretar debido a la intensa actividad eólica. En el caso de la cuenca torrencial que se encuentran en los alrededores del sitio arqueológico Chankillo, existe un cauce aparentemente inactivo (ver Foto 3); sin embargo, debido a las precipitaciones del año 2017 ocurrió la activación de algunas quebradas, ocurriendo algunos flujos de detritos (ver Foto 4), cuyos depósitos fueron sepultados rápidamente en unos días por la arena (Municipalidad Provincial de Casma, 2017b).



FOTO 3. PLANICIE ALUVIAL Y CAUCE EN LOS ALREDEDORES DE CHANKILLO. FOTO: CÉSAR ABAD PÉREZ/MUNICIPALIDAD PROVINCIAL DE CASMA, 2017



FOTO 4. PEQUEÑO FLUJO DE DETRITOS PRODUCIDO EN LOS ALREDEDORES DEL SITIO ARQUEOLÓGICO CHANKILLO. FOTO: CÉSAR ABAD PÉREZ/MUNICIPALIDAD PROVINCIAL DE CASMA, 2017

En el caso de la margen izquierda, del área de estudio, resalta el abanico aluvial llamado Pampa de las Llamas (ver Foto 5), el mismo que muestra evidencias de activaciones muy recientes. Se trata de dos abanicos coalescentes. No hay un cauce estable que permita llevar el material de manera

concentrada. Lo que se puede observar es un sinnúmero de canales que acarrear material en un flujo casi laminar, a veces concentrado.

Según el Plan de Manejo de Chankillo (Municipalidad Provincial de Casma, 2017b), “gran parte de estos flujos se producen en las vertientes del cerro Mucho Malo. La altura del cerro, el tipo de roca, su pendiente y su orientación favorecen la concentración de los flujos laminares en los cauces, la evidencia geomorfológica muestra gran actividad de torrenteras”.



FOTO 5. ABANICO ALUVIAL PAMPA DE LAS LLAMAS CON VIDENCIAS DE FLUJOS RECIENTES. FOTO: CÉSAR ABAD PÉREZ/MUNICIPALIDAD PROVINCIAL DE CASMA, 2017

b. Terrazas aluviales y lecho de río

En esta unidad existe la mayor ocupación, y a su vez la mayor afectación por las inundaciones.

El río Casma presenta por muchos tramos un drenaje trezado, es decir, no tiene un cauce fijo, cuya dinámica depende principalmente de las crecidas relacionadas, principalmente, por el Fenómeno el Niño. Esta unidad presenta un ancho variable que varía entre los 1000 y 1700 metros en el área de estudio (ver Foto 6).



FOTO 6. VALLE DEL RÍO CASMA. FOTO: CÉSAR ABAD PÉREZ, 2018

Los sedimentos que conforman esta unidad están clasificados como cantos rodados, gravas y material arcillo limoso. Los cantos presentan formas subredondeadas a redondeadas. Estos se encuentran entremezclados en diferentes proporciones debido a que han sido depositados en condiciones muy variables (Zavaleta, 2016).

FORMAS DE ORIGEN DENUDACIONAL

Las formas de origen denudacional están vinculadas principalmente por la acción de la erosión hídrica como por la sedimentación producto de este proceso.

a. Glacis

Son depósitos de piedemonte que no tienen mucha pendiente y son el resultado de escorrentías laminares y en surcos. Existen zonas muy extensas con presencia de glacis, muchas veces recubiertos por arena, principalmente hacia la margen izquierda del río.

b. Colinas

En el área de estudio predominan rocas volcánicas sedimentarias e intrusivas. Hacia la margen derecha tenemos afloramientos de tonalitas diaclasadas que han sido allanadas por procesos erosivos en el pasado. Forman colinas con cimas aplanadas. Algunas de ellas están asociadas a procesos tectónicos, como las que se muestran en la foto 8, donde en el primer plano se puede observar una faceta triangular producto de la presencia de una falla geológica, la misma que cuenta muestra evidencias de ocupación prehispánica.



FOTO 7. COLINAS MODELADAS EN ROCA INTRUSIVA, CON EVIDENCIAS DE OCUPACIÓN PREHISPÁNICA. FOTO: CÉSAR ABAD PÉREZ, 2018

En la margen derecha se observan colinas con altitudes superiores a los 800 metros. Estas han sido modeladas predominantemente en roca volcánico sedimentaria, presentando fuertes pendientes, y formando parte de las cabeceras de las cuencas torrenciales (ver Foto 8).



FOTO 8. COLINAS EN LOS ALREDEDORES DEL CONO ALUVIAL PAMPA DE LAS LLAMAS. FOTO: CÉSAR ABAD PÉREZ, 2018

FORMAS DE ORIGEN EÓLICO

Se encuentran hacia la margen izquierda del río. Recubren las colinas y los conos aluviales y glaciares. El material proviene de las playas de arena, también existe aporte de material por parte de la alteración in situ de la roca. La zona de transporte y depositación es muy amplia y alejada de su fuente. Son más de 20 km desde Playa Grande hasta el área de estudio (Municipalidad Provincial de Casma, 2017b).

En la margen izquierda del río y, en los que constituiría el ecotono entre el valle y el desierto, hay un corredor ecológico de 12 kilómetros (ver Foto 9), donde la especie predominante es el algarrobo

(Prosopis sp), formando a su vez un cordón de dunas estabilizadas (Municipalidad Provincial de Casma, 2017b).

Los algarrobos son plantas freatofitas, es decir, sus raíces buscan aguas subterráneas. Se han encontrado algarrobos con hasta 40 metros de profundidad de raíces. Aparentemente este sector sería el límite del nivel freático que bordea los 40 metros (o menos) de profundidad.

Las ramas y follaje de los algarrobos contribuyen a retener la arena, y a su vez, impiden la entrada de la arena en el Valle. Esta variedad de prosopis crece postrada, lo que le permite seguir estabilizando la duna, la que, a su vez va recibiendo materia orgánica en su interior (ver Foto 10).



FOTO 9. DUNAS BARJÁN ACTIVAS Y FRENTE DE DUNAS ESTABILIZADAS POR LOS ALGARROBOS. FOTO: CÉSAR ABAD PÉREZ/MUNICIPALIDAD PROVINCIAL DE CASMA, 2017



FOTO 10. DUNAS ESTABILIZADAS POR EL ALGARROBO. FOTO: CÉSAR ABAD PÉREZ/MUNICIPALIDAD PROVINCIAL DE CASMA, 2017

3.4. Clima e hidrología

CLIMA

El área de estudio presenta un clima predominantemente desértico. La estación meteorológica más cercana al área de estudio es la Estación Buena Vista, que se encuentra a una altitud de 220 msnm. La precipitación media anual para la mayor parte del área de estudio es de 3.29 mm (INRENA, 2007b); por este motivo, la actividad agrícola depende principalmente de las aguas provenientes de las partes altas, y en menor medida de la explotación del acuífero. A pesar de tan bajas precipitaciones, en el mes de marzo del año 2017, con 8 horas de lluvia en la zona desértica, se activaron varias cuencas torrenciales, lo que evidencia que muchas formas de relieve que muestran signos de erosión hídrica que revelan escorrentías pasadas que podrían reactivarse.

Las máximas temperaturas se presentan entre los meses de enero a abril (ver Figura 7), siendo la máxima temperatura promedio de 26°C en el mes de febrero. La mínima se encuentra en el mes de julio, con un poco más de 18°C.

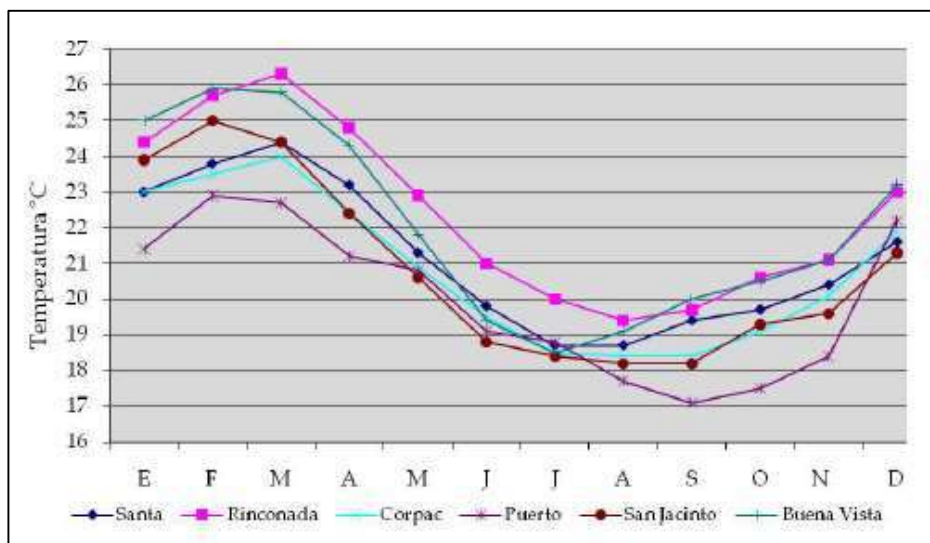


FIGURA 7. TEMPERATURA MEDIA MENSUAL (HUARAC, 2011).

La humedad relativa es de 80% en febrero y 94% en julio (Huarac, 2011). Un parámetro de importancia en la zona es la velocidad del viento, pues en parte del área de estudio se encuentra un corredor de dunas, siendo necesario conocer la velocidad y direcciones predominantes, así como su estacionalidad. La dirección predominante del viento en la estación Buena vista es Sur y Sur oeste. La velocidad oscila entre 1 a 7 m/s, siendo mayor entre las 12 y 15 horas (Huarac, 2011). Según el Atlas Eólico del Perú Perú (Valvidia Romero & Gamarra, 2008), la velocidad del viento se mantiene casi constante durante todo el año.

Como puede observarse en la Figura 8, los sistemas de vientos son muy complejos y tienen una dirección predominante S o SW (Municipalidad Provincial de Casma, 2017b), en algunos casos llegan

a estar en dirección W-E, debido al condicionamiento topográfico, formándose corredores de dunas, y evidenciándose a través de la arena depositada hasta más de 1000 msnm (hay que tener en cuenta que esta arena proviene de la depositación marina en las playas que se encuentran más al sur).

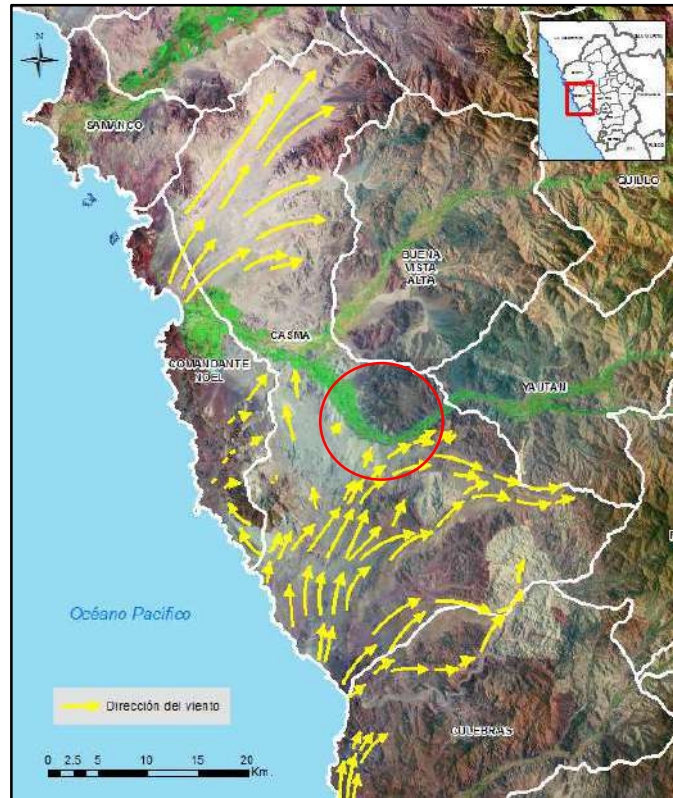


FIGURA 8. DIRECCIONES PREDOMINANTES DE LOS VIENTOS (MUNICIPALIDAD PROVINCIAL DE CASMA, 2017B).

HIDROLOGÍA

El ámbito de estudio forma parte de la cuenca del río Casma, con sus nacientes en las alturas de la Cordillera Negra. La cuenca tiene una altitud máxima de 4862 m.s.n.m. El área de estudio se encuentra en el tramo denominado medio bajo, que cuenta con una pendiente media de entre 0.6 y 0.7 % (INRENA, 2007a). Como puede observarse en la Figura 9, aguas arriba del área de estudio hay un cambio importante de pendiente (entre 2.9 % a 0.7 %), lo que influye significativamente en la capacidad del río, lo que permite que haya una alta descarga de sedimentos en la zona, formándose el patrón trenzado del cauce.

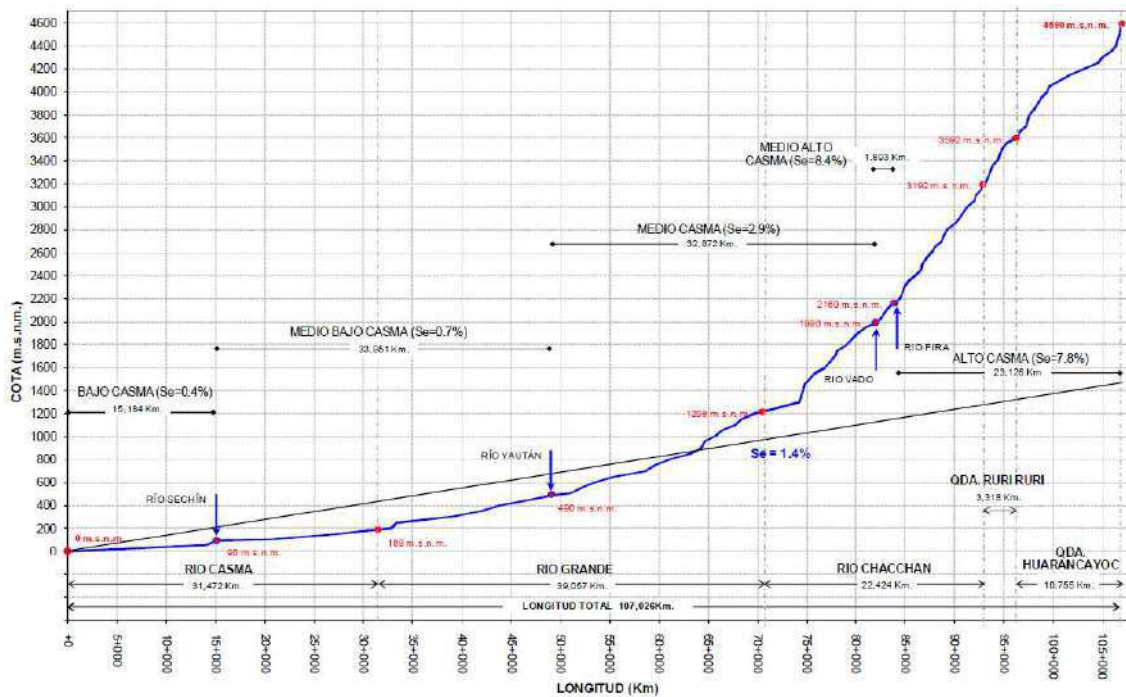


FIGURA 9. PERFIL LONGITUDINAL DEL RÍO CASMA (INRENA, 2007A)

El río Casma presenta un régimen irregular de carácter torrencioso, con marcadas diferencias entre sus caudales medios diarios, los que varían entre un máximo de 320 m³/seg y un mínimo de 0.0 m³/seg. La media anual en la estación Puente Carretera es de 5.4 m³/seg, equivalente a un volumen medio anual de 170310000 m³ y en la estación de Pactao es de 7.33 m³/seg.

El balance hídrico del Valle de Casma, muestra un déficit de 43 MMC distribuidos durante todos los meses, con excepción de febrero y marzo, donde se presenta un superávit (ver Figura 8). La principal demanda de agua superficial proviene de la actividad agrícola. La demanda poblacional es satisfecha con agua subterránea.

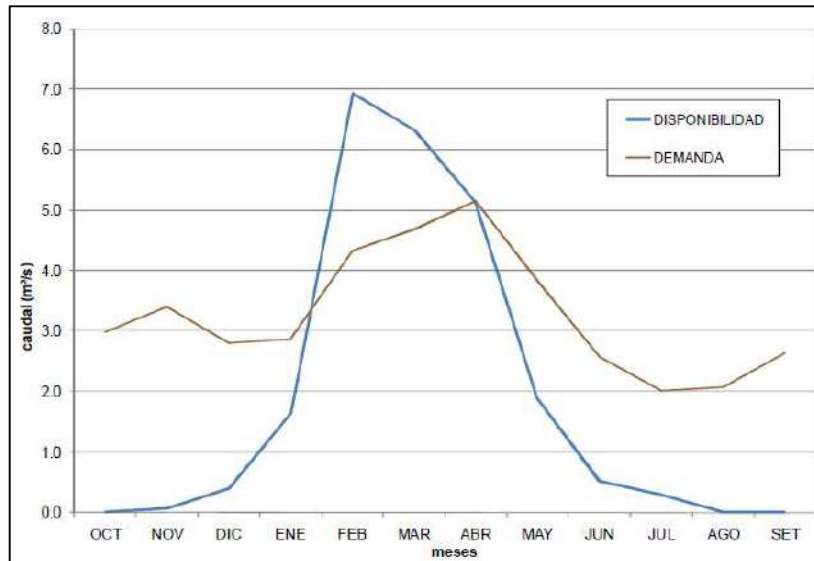


FIGURA 10. BALANCE HÍDRICO GENERAL DE CASMA (M3/SEG). (INRENA, 2007A)

HIDROGEOLOGÍA

El acuífero en la zona de Casma presenta variaciones, en materiales fluviales y aluviales. Las aguas subterráneas corresponden a un acuífero libre alimentado por filtraciones a través del cauce del río Casma, canales de riego no impermeabilizados, y de las áreas bajo riego.

El nivel del agua subterránea se encuentra desde unos centímetros hasta 4.5 m por debajo de la superficie del suelo. El valle cuenta con 222 pozos en funcionamiento, de los cuales 151 pozos corresponden al Valle de San Rafael. La salinidad del agua baja, siendo inferior a 1.0 mmhos/cm

(Huarac, 2011). Durante el año 2002, el acuífero de Casma no presentaba un descenso crítico de la superficie piezométrica, manteniéndose casi en equilibrio.

En un modelo hidrogeológico desarrollado el año 2016 (Zavaleta, 2016), se estimó que el descenso causado por las extracciones (31116792 m³/año) del acuífero es de 6 m. El escenario más crítico se produciría si se incrementa un 70% adicional a las explotaciones actuales.

EL FENÓMENO EL NIÑO

El fenómeno El Niño es la principal anomalía climática recurrente que genera una gran afectación en el área, principalmente por la ocurrencia de inundaciones y flujos de detritos. En cuanto a los registros instrumentales, se tiene un registro entre 1960 y 1999 (Tabla 3). Tal como puede observarse, en los principales episodios El Niño, como el de 1997-1998 se generó una descarga de 410 m³/seg.

TABLA 3. REGISTRO DE DESCARGAS MÁXIMAS ANUALES (MEDIAS DIARIAS MÁXIMAS) DEL RÍO CASMA (ADMINISTRACIÓN TÉCNICA DEL DISTRITO DE RIEGO NEPEÑA-CASMA-HUARMEY, 1999).

ANO	MES	CAUDAL m ³ /S
1960	Febrero	75.00
1961	Abril	135.00
1962	Marzo	70.00
1963	Abril	70.00
1964	Abril	21.00
1965	Marzo	78.00
1966	Febrero	13.00
1967	Febrero	65.00
1968	Marzo	25.00
1969	Marzo	20.00
1970	Enero	120.00
1971	Febrero	105.00
1972	Marzo	140.00
1973	Enero	50.00
1974	Febrero	50.00
1975	Marzo	50.00
1976	Marzo	60.00
1977	Abril	40.00
1978	Febrero	19.30
1979	Marzo	84.50
1980	Abril	33.40
1981	Febrero	43.62
1982	Febrero	24.87
1983	Marzo	80.00
1984	Marzo	47.00
1985	Febrero	25.80
1986	Enero	33.90
1987	Enero	22.50
1988	Enero	20.00
1989	Febrero	34.00
1990	Diciembre	13.00
1991	Marzo	40.00
1992	Marzo	7.00
1993	Marzo	80.00
1994	Febrero	80.00
1995	Febrero	13.00
1996	Marzo	100.00
1997	Febrero	30.00
1998	Enero	410.00
1999	Febrero	90.00

CAUDALES MÁXIMOS

En cuanto a los cálculos de máximas avenidas, el Ministerio de Agricultura realizó el cálculo de caudales máximos, obteniendo 183.29 m³/seg para un periodo de 25 años, 235.3 para 50 años, 242.1 para 75 años, 245.48 para 100 años y 364.88 para 200 años (Apacla Nalvarte, 2010).

Tal como se muestra en la figura 11, durante eventos El Niño cambia el patrón de distribución de las precipitaciones en la cuenca del río Casma (límite en blanco), siendo mayor hacia la parte oeste, que corresponde a la zona costera. En los 3 ENSO mostrados en la figura existió incrementos de más del 100% correspondientes a periodos trimestrales. Las anomalías fueron más significativas estas

durante las precipitaciones de los años 1983 y 2017, existiendo un incremento de más del 500 % en el año 1983, y casi 2000 % en el 2017. Estas anomalías no solo han tenido una repercusión en el caudal del río Casma, sino también en la actividad de las cuencas torrenciales.

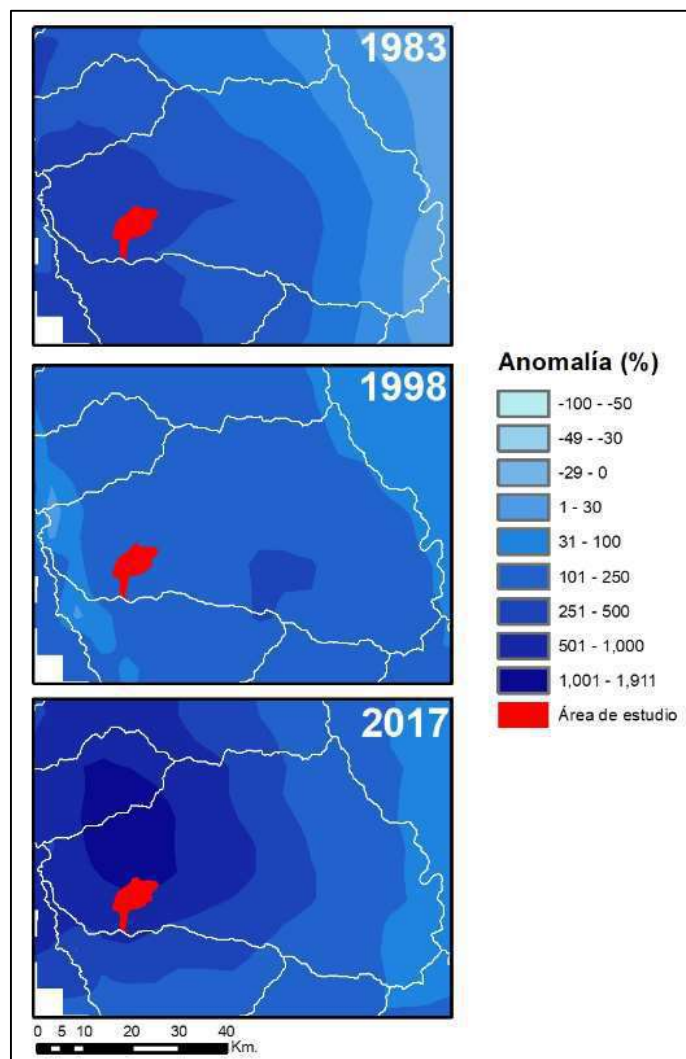


FIGURA 11. ANOMALÍAS DE PRECIPITACIÓN DURANTE LOS ENSO 1982/1983, 1997/1998 Y 2017.
FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA EN BASE AL PRODUCTO GRILLADO PISCO (AYBAR ET AL., 2017)

3.5. Uso del suelo y características socioeconómicas

La principal actividad económica en el Valle de San Rafael es la agricultura destinada a la agroexportación (predominantemente mango y palta). Existe un movimiento pendular diario y semanal de los trabajadores agrícolas hacia la ciudad de Casma (Municipalidad Provincial de Casma, 2017b), que se encuentra a 15 minutos en vehículo.

La provincia de Casma cuenta con una población total de 42,368 habitantes (INEI 2007); sin embargo, en el ámbito de estudio la población es solo de 483 habitantes y es eminentemente rural (Municipalidad Provincial de Casma, 2017b).

3.6. La ocupación prehispánica del Valle San Rafael

Existe evidencia material de ocupación del Valle del río Casma data de más de 5000 años (Bischof, 2009; Pozorski & Pozorski, 2006), siendo un valle bastante estudiado desde hace más de 70 años (Bischof, 2009), existiendo gran cantidad de datos arqueológicos y radiométricos. En la figura 12 se indican con color rojo algunos de los principales sitios arqueológicos del ámbito de estudio.

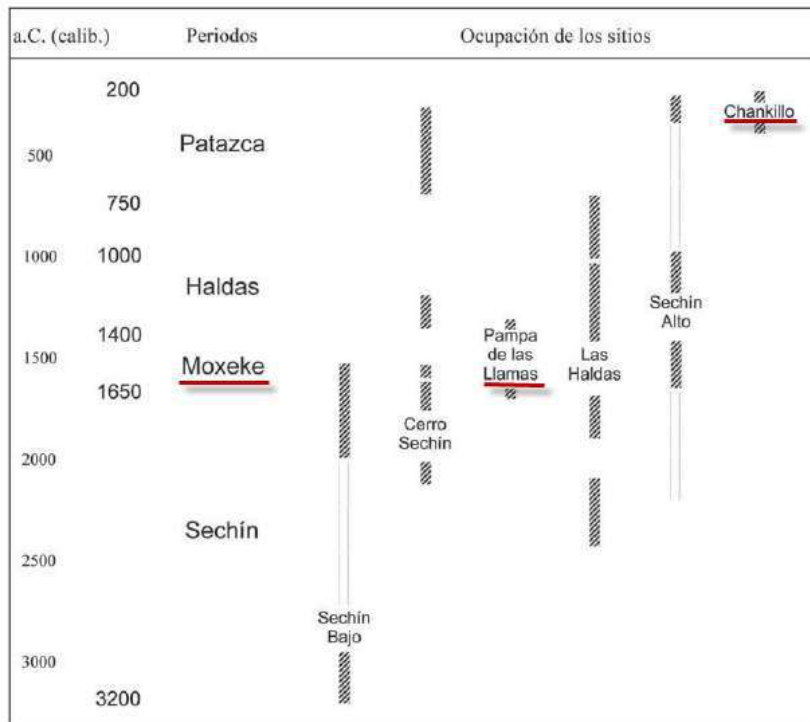


FIGURA 12. PERIODOS CULTURALES Y SITIOS ARQUEOLÓGICOS PRINCIPALES DEL VALLE DE CASMA (BISCHOF, 2009)

En el Valle de Casma existe aún evidencia de presencia de grandes complejos arquitectónicos que datan del denominado Periodo Inicial (2500-100 a.C.). Según algunos investigadores (Pozorski & Pozorski, 1998), se trata de algunos de los complejos arquitectónicos más grandes de América. Las principales evidencias arqueológicas se encuentran en los conos aluviales y glaciares, así como en algunas vertientes. Tal como se puede observar en la figura 10, existen siete sitios arqueológicos principales; de los cuales, cuatro de ellos cuentan con delimitaciones. Para el Estado peruano, estas delimitaciones implican protección de los sitios arqueológicos a través de las restricciones de uso.

Algunos de estos complejos arqueológicos, como Pampa de las Llamas – Moxeke fueron centros políticos para el control del Valle de Casma. Según los mismos autores, estos complejos arqueológicos están dominados por grandes montículos miden más de 100 m. Según los fechados

citados por los autores en otras publicaciones, existen fechados de entre los 2700 y 1120 a.C., lo que muestra una larga ocupación (Bischof, 2009).

Otro caso es el de Chankillo, que se encuentra hacia la margen izquierda del valle. Según las investigaciones de Iván Ghezzi (I. A. Ghezzi, 2016), este complejo fue edificado hacia los 400 a.C., el mismo que también constituyó un observatorio solar.

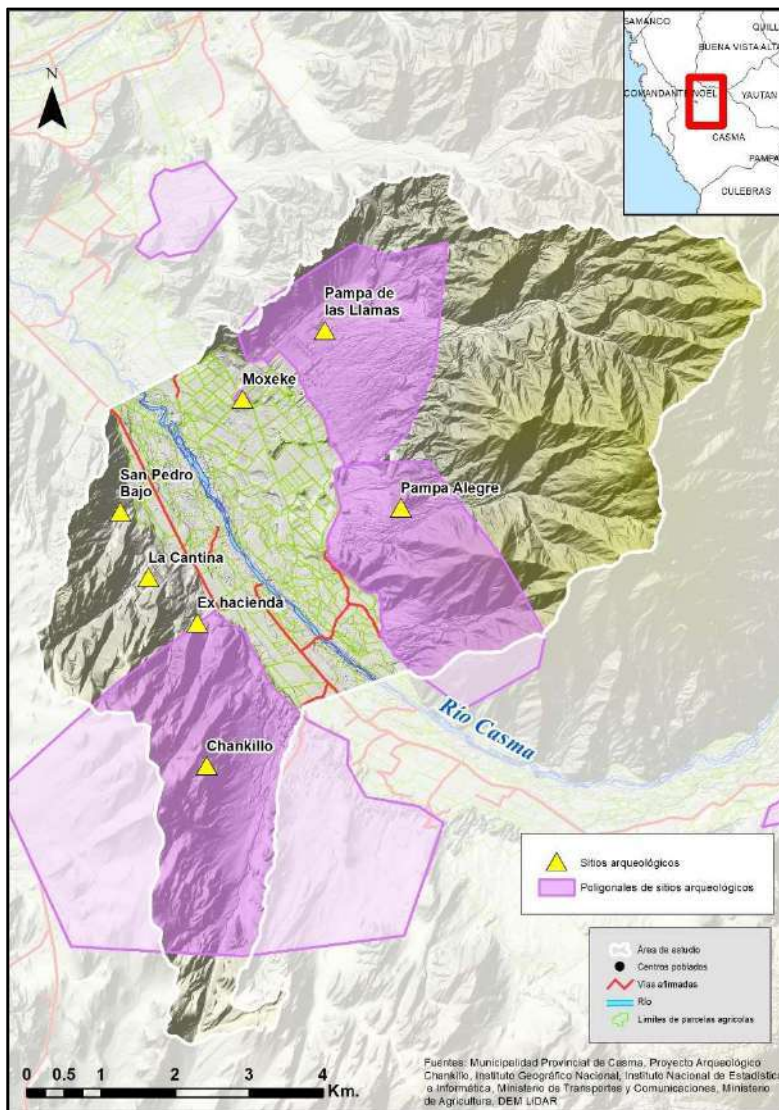


FIGURA 13. SITIOS ARQUEOLÓGICOS DELIMITADOS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA EN BASE A INFORMACIÓN DEL MINISTERIO DE CULTURA Y EL PROYECTO ARQUEOLÓGICO CHANKILLO

4. Metodología

Se usó como referencia la metodología propuesta en la “Guía metodológica para el desarrollo del sistema nacional de cartografía de zonas inundables” (Martínez & Fernández, 2011). Se realizaron algunas modificaciones y adaptaciones en función a la información disponible y a otras propuestas metodológicas que luego serán explicadas. También se realizó un análisis de las medidas de gestión implementadas para la mitigación del riesgo, las mismas que fueron contrastadas con los resultados del análisis geomorfológico-histórico. El proceso general puede observarse en la figura 14.

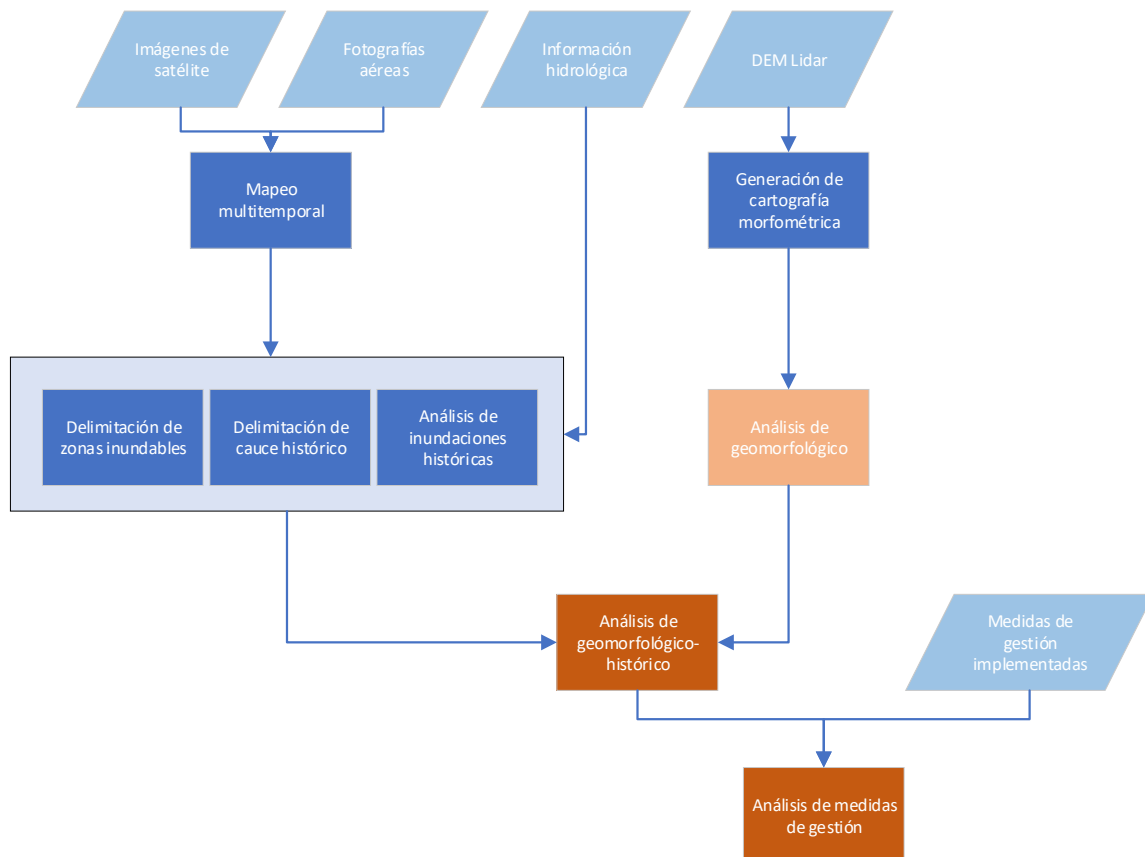


FIGURA 14. PROCESO METODOLÓGICO

El estudio se realizó a escala 1/25000. Primero se realizó una delimitación del área de estudio, así como una identificación del medio fluvial y torrencial, con la finalidad de separar claramente la zona de actividad del río Casma.

El estudio geomorfológico – histórico partió con el análisis histórico, donde realizó un análisis de inundaciones históricas en base al análisis multitemporal de fotografías aéreas e imágenes de satélite, teniendo como referencia las series hidrométricas históricas. Luego se realizó un análisis geomorfológico en base a imágenes de satélite e índices morfométricos, así como también un análisis de usos del suelo. Esta cartografía fue verificada en campo, donde se realizaron entrevistas, así como el llenado de fichas para registrar las evidencias de actividad geodinámica. Esto permitió realizar el análisis geomorfológico histórico y la determinación de peligros por inundaciones. También se registraron las medidas de gestión implementadas, las mismas que fueron comparadas con los resultados, lo que permitió evaluar su pertinencia y brindar algunas recomendaciones para la gestión.

4.1. Materiales y equipos

FOTOGRAFÍAS AÉREAS ANTIGUAS E IMÁGENES DE SATÉLITE

Las fotografías aéreas e imágenes de satélite fueron seleccionadas en función al registro de descargas máximas anuales (Tabla 3). Se cuenta con un registro de sensores remotos, desde el año 1966 para las fotografías aéreas, y se cuenta con imágenes de satélite desde 1972 hasta la fecha (ver Tabla 4).

TABLA 4. FOTOGRAFÍAS AÉREAS E IMÁGENES DE SATÉLITE UTILIZADAS. ELABORACIÓN PROPIA

MÁXIMA DESCARGA			SATÉLITE	SENSOR	FECHA
AÑO	MES	CAUDAL (m ³ /seg)			
2017	Marzo		Sentinel-2	MultiSpectral Instrument	25/03/2017
					5/03/2017
2006	Marzo		QuickBird		26/05/2007
					28/02/2006
1999	Febrero	90	Landsat 5	Thematic Mapper	18/12/1999
					8/01/1999
1998	Enero	410			10/03/1998
					3/02/1997
1996	Marzo	100			1/02/1996
1994	Febrero	80			5/07/1994
					7/11/1993
1993	Marzo	80			28/03/1993
					8/02/1993
1983	Marzo	80			Landsat 4
			Landsat 3	28/03/1979	
1979	Marzo	84.5		4/08/1975	
1972	Marzo	140		31/12/1972	
1971	Febrero	105			
1970	Enero	120			
1961	Abril	135	Fotografías aéreas de 1966		

IMÁGENES LiDAR

Se contó con una nube de puntos levantada en el mes de marzo de 2017 por la empresa Horizons para el Proyecto Arqueológico Chankillo.

EQUIPO

- PC con CPU Intel Core I7
- Tableta digitalizadora Wacom Intuos Pro
- GPS Navegador
- Cámara fotográfica
- Cinta métrica
- Picota

PROGRAMAS INFORMÁTICOS

- ArcGIS
- PCI Geomatica
- ENVI
- Global Mapper

4.2. Delimitación del área de estudio e identificación del medio fluvial y torrencial

Uno de los primeros pasos para el análisis fue la delimitación más precisa del ámbito de estudio, principalmente para la diferenciación del medio fluvial y el medio torrencial. Para ello, se realizó la delimitación en base a la información cartográfica disponible y al conocimiento de campo, puesto que realicé algunas salidas durante el año 2017.

Para una primera delimitación se usó el mapa geomorfológico generado en el año 2017 (Municipalidad Provincial de Casma, 2017b), el mismo que está a escala 1/25000. Se realizó una verificación más exhaustiva de las unidades geomorfológicas vinculadas con el medio fluvial y torrencial, teniendo como apoyo imágenes de Google Earth e imágenes Landsat del año 2017. Como resultado de esta verificación, se decidió realizar una delimitación más detallada, puesto que había algunas dudas sobre la información existente. Para ello se procesó la información cartográfica disponible con la finalidad de identificar evidencias morfológicas que permitan una mejor delimitación, lo que posteriormente permitió elegir los mejores métodos de procesamiento de información, así como planificar mejor las salidas al campo. El proceso consistió en:

- Procesamiento de información LiDAR.
- Generación de información morfométrica.
- Generación de componentes principales.
- Generación automática de cauces.
- Delimitación del medio fluvial y torrencial.

4.2.1. Procesamiento de información LiDAR

Se procesó la nube de puntos LiDAR del mes de marzo de 2017, con el software Global Mapper. Posteriormente se generó el modelo de elevación digital con 2 metros de resolución. Luego se realizó un acondicionamiento del MDE con el software ArcGIS, para eliminar pequeñas imperfecciones del mismo, lo que luego permite generar mapas morfométricos.

4.2.2. Generación de información morfométrica

Antes de iniciar la interpretación, se generó cartografía morfométrica para contar con información suficiente para el mapeo. Los índices morfométricos generados en esta etapa fueron:

- Pendientes

El mapa de pendientes fue generado de manera automática con el software ArcMap 10.4 a partir del DEM LiDAR (Figura 15).

- Orientaciones

El mapa de orientaciones fue generado de manera automática con el software ArcMap 10.4, a partir del DEM LiDAR. Este mapa, a diferencia del mapa de pendientes, permite resaltar la rugosidad presente en planicies con presencia de canales secundarios (figura 16).

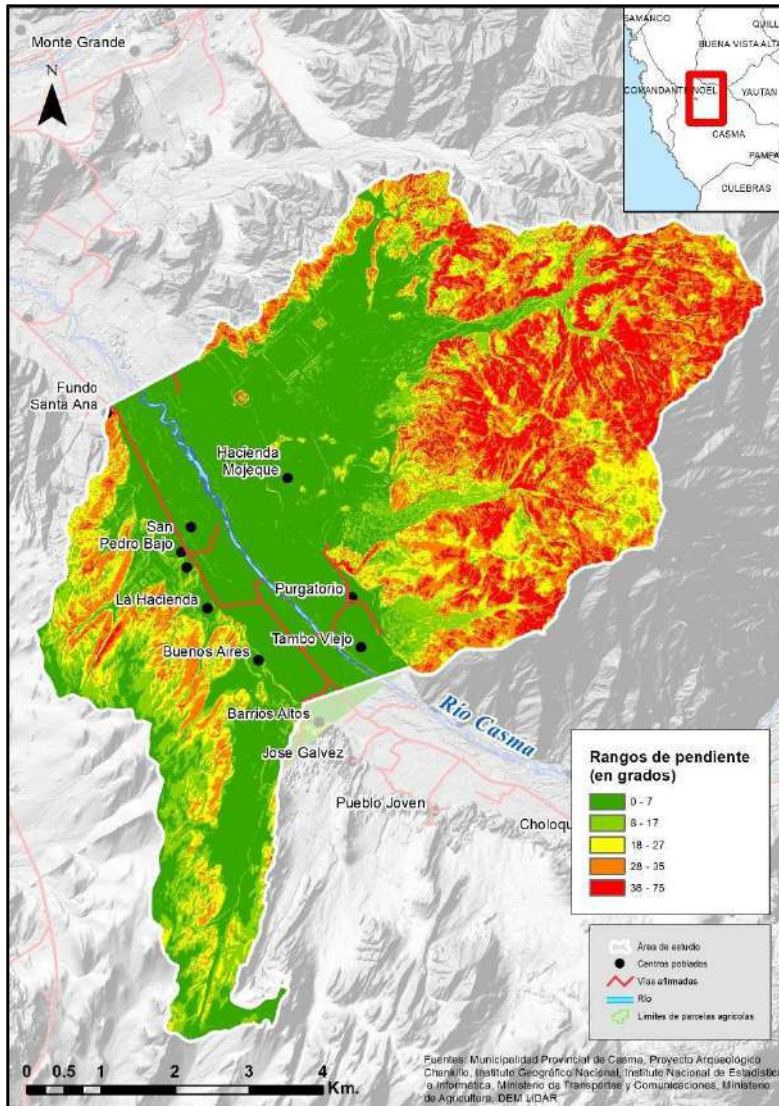


FIGURA 15. MAPA DE PENDIENTES. ELABORACIÓN PROPIA EN BASE AL DEM LIDAR

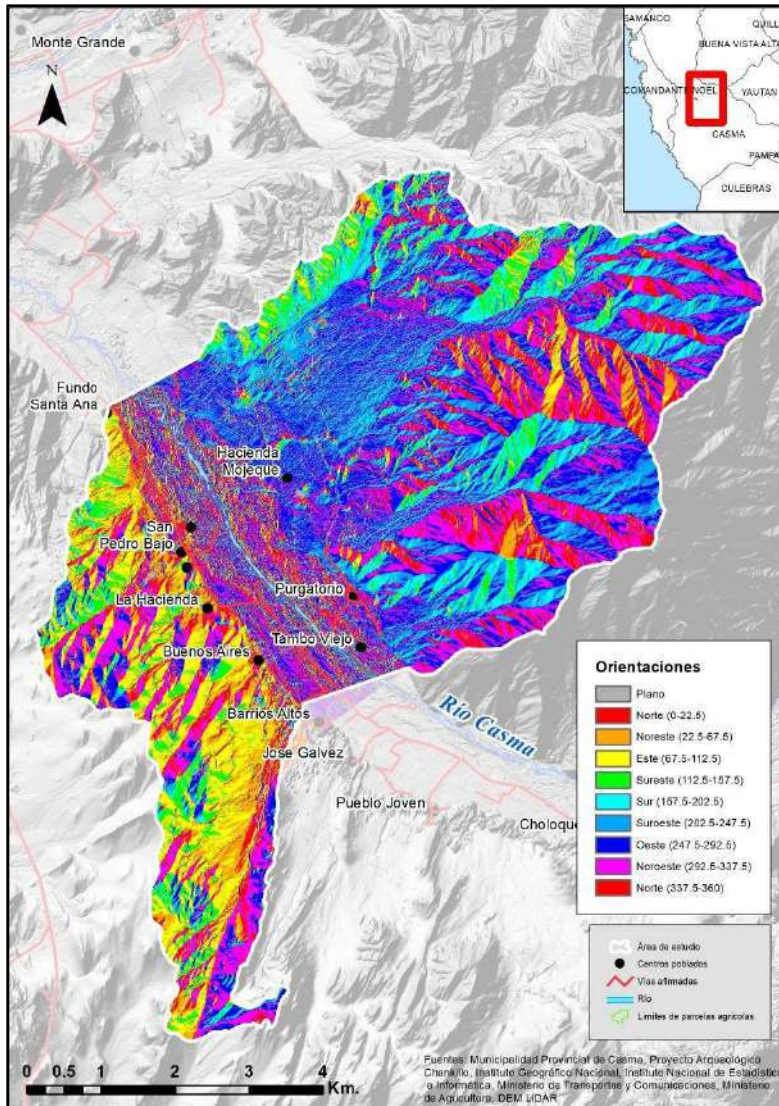


FIGURA 16. MAPA DE ORIENTACIONES. ELABORACIÓN PROPIA EN BASE AL DEM LIDAR

4.2.3. Generación de componentes principales

Se realizó un análisis por componentes principales y luego una composición a partir de los resultados de los mismos, con la finalidad de facilitar el análisis visual. La técnica de análisis de componentes principales, mayormente usada en teledetección espacial, permite reducir la redundancia de la información de entrada (normalmente bandas espectrales). En este caso se usó para permitir hacer una combinación de variables como y ser visualizadas como composiciones RGB (Figura 18). Se usó

las pendientes, orientaciones y el MDE. Tal como puede apreciarse en la figura 17, esta composición RGB de componentes principales derivados de parámetros morfométricos, permite discriminar más claramente que solo desde la imagen de satélite, o los mapas morfométricos individuales, el ámbito fluvial del torrencial, pues permite resaltar de manera más clara patrones lineales como saltos de pendientes, o patrones sinuosos formados por los cauces presentes en el cono aluvial.

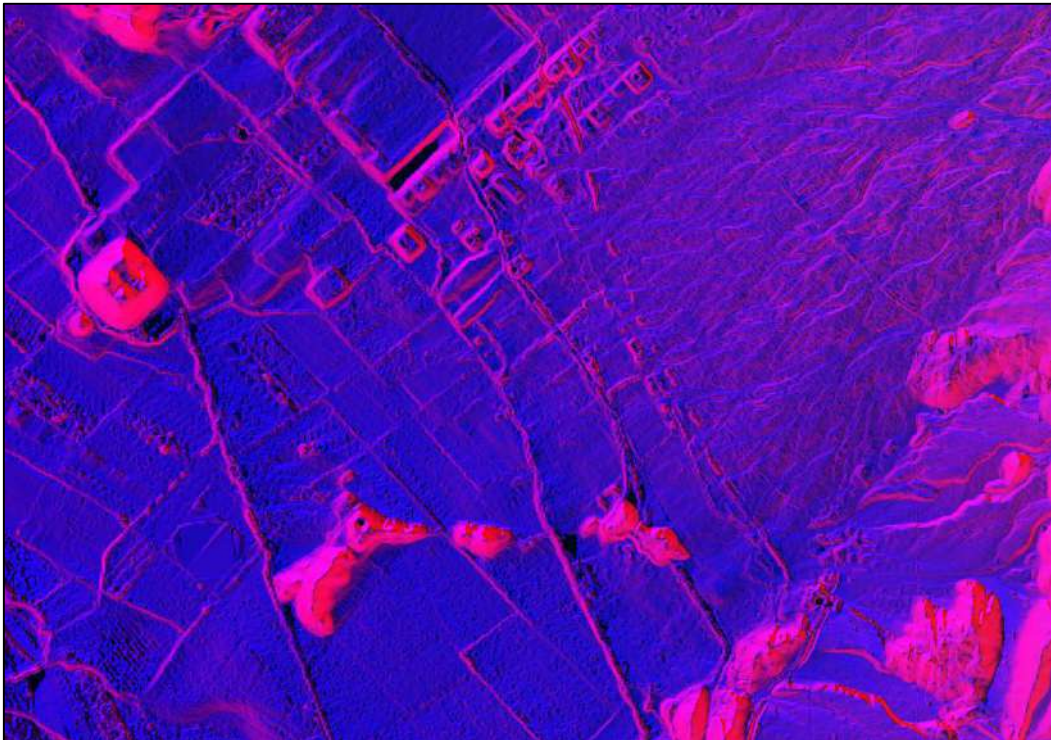


FIGURA 17. DETALLE DE COMPOSICIÓN RGB DE COMPONENTES PRINCIPALES A PARTIR DE PARÁMETROS MORFOMÉTRICOS

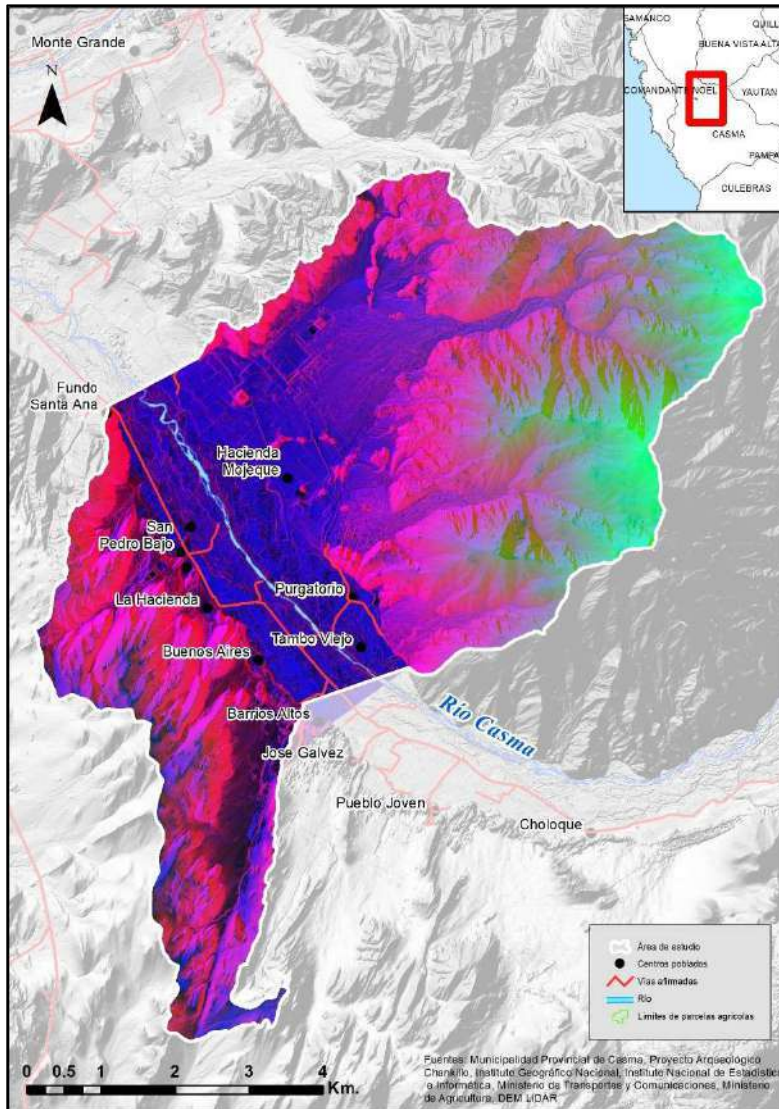


FIGURA 18. COMPOSICIÓN RGB DE COMPONENTES PRINCIPALES. ELABORACIÓN PROPIA EN BASE AL DEM LIDAR

4.2.4. Generación automática de cauces

Gracias a las posibilidades que permite el MDE LiDAR debido a su resolución, se generó de manera automatizada la red de drenaje, a partir del cálculo de la dirección de flujo y la acumulación de flujo. Esta red de drenaje fue luego verificada y editada (Figura 19).

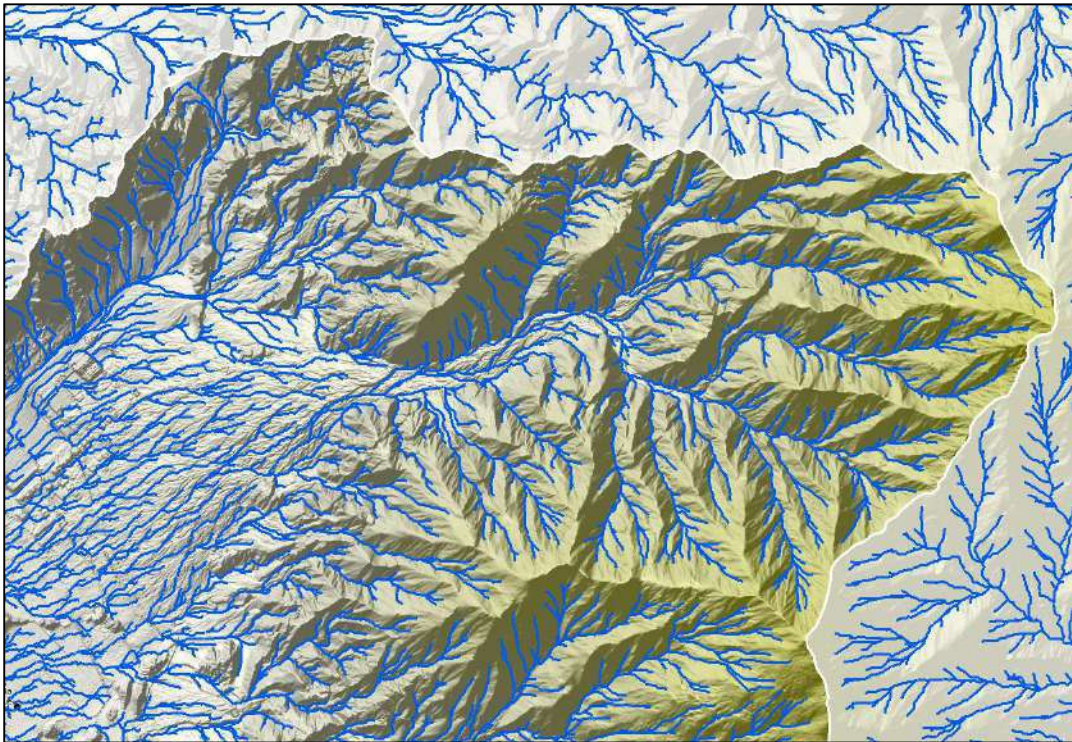


FIGURA 19. DETALLE DE LA RED DE DRENAJE GENERADA DE MANERA SEMIAUTOMÁTICA.

4.2.5. Delimitación del medio fluvial

La toda la información generada previamente permitió la delimitación del medio fluvial, teniendo como referencia la cartografía geomorfológica existente. En el caso de medio fluvial, se consideró como referencia para la delimitación las evidencias de terrazas, así como los límites de los conos aluviales. Esto permitió precisar mejor estos límites de estos ámbitos para un mejor análisis de los procesos morfodinámicos que predominan en cada uno de ellos, así como también las cuencas torrenciales (ver Figura 20).

Para la delimitación de las cuencas torrenciales se usó un procedimiento semiautomatizado que consistió en la delimitación automática de cuencas a partir de puntos definidos en los cauces principales de las cuencas torrenciales, y luego se realizó una verificación y edición en base a las curvas de nivel, imágenes de satélite y vistas 3D con Google Earth.

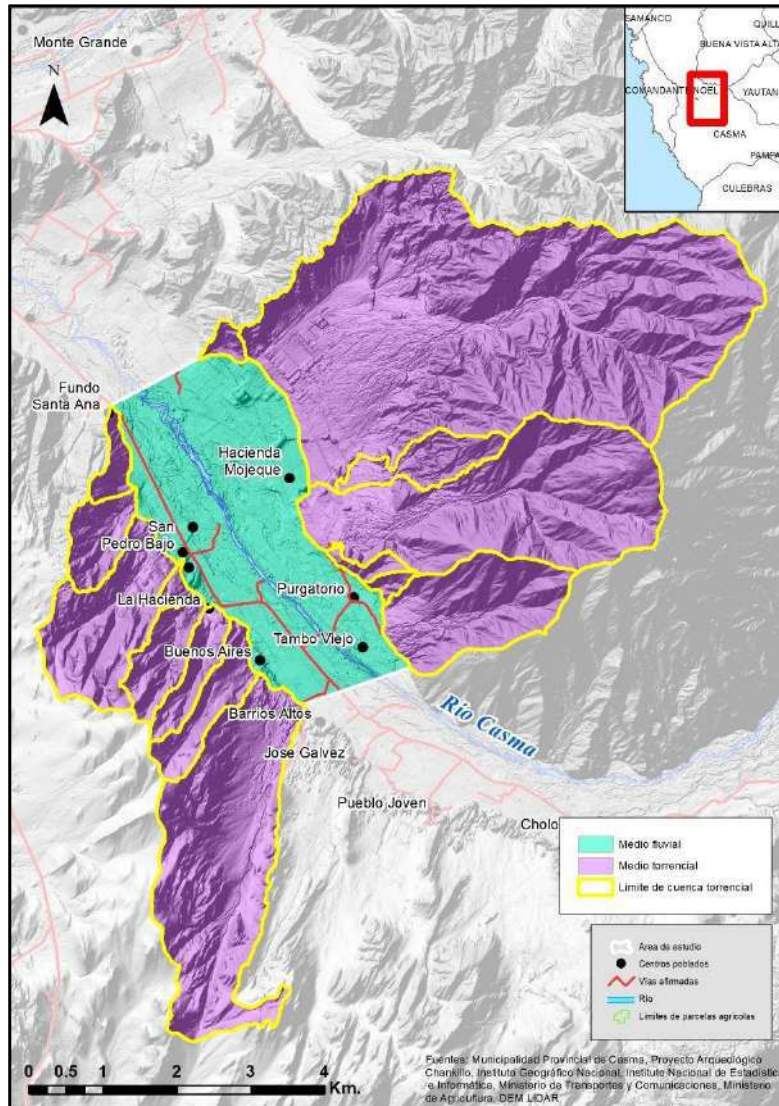


FIGURA 20. DELIMITACIÓN DEL MEDIO FLUVIAL Y TORRENCIAL. ELABORACIÓN PROPIA.

4.3. Trabajo de campo

El trabajo de campo consistió en 4 actividades principales:

- Entrevistas y mapeo participativo de inundaciones históricas.
- Identificación de evidencias de inundaciones y flujos de detritos.
- Recopilación de información secundaria e instrumentos de gestión.

El trabajo de campo se realizó entre el 1 y 15 de mayo del año 2018. En la figura 21 se pueden observar en amarillo las zonas recorridas. Se cuenta con más de 500 puntos de observación, los mismos que han permitido verificar las evidencias morfológicas de inundaciones y flujos de detritos, conjuntamente con la población local.

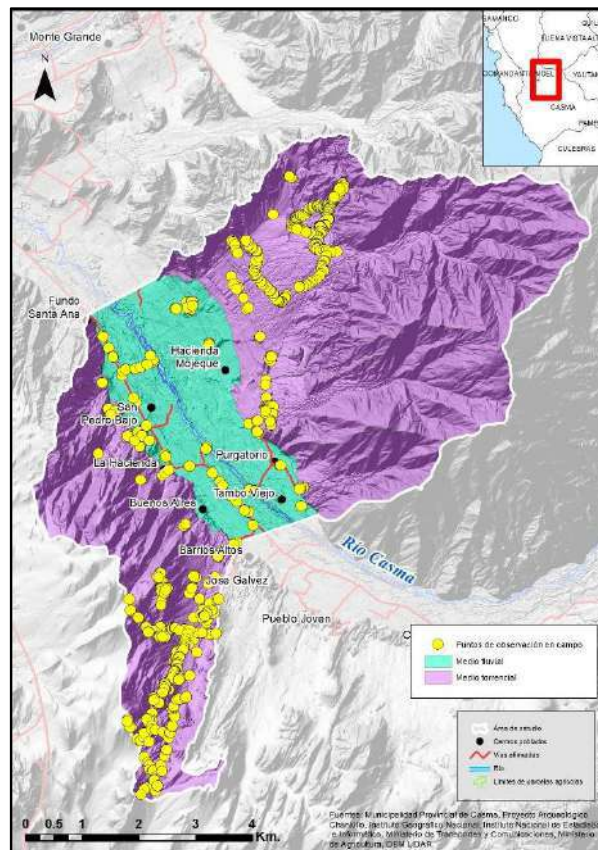


FIGURA 21. RECORRIDO DE CAMPO. ELABORACIÓN PROPIA

No se pudo acceder a algunas zonas mu escarpadas en las cuencas torrenciales, tampoco a algunas propiedades privadas en la zona del valle; sin embargo, se cuenta con buena información de las principales evidencias de la dinámica fluvial y torrencial.

4.3.1. Entrevistas y mapeo participativo de inundaciones históricas

El mapeo de las zonas inundadas se realizó con el acompañamiento del señor Rigoberto Cabello, presidente de la Comisión de Riego de San Rafael, teniéndose la ventaja de que los principales interesados en la ejecución de obras de protección contra inundaciones son los mismos agricultores; por ello, fue posible conocer también las expectativas y propuestas. Con su acompañamiento fue posible entrar en contacto con los agricultores de la zona (ver Fotos 11 y 12) y con los representantes de la Junta de Usuarios de Casma, y conocer mejor el proceso de ocupación vinculado con la dinámica de las inundaciones, así como el cambio de uso de la tierra.



FOTO 11. VISITA AL CAMPO CON EL PRESIDENTE DE LA COMISIÓN DE RIEGO Y AGRICULTORES EN ZONA INUNDADA DEL SECTOR DE SAN RAFAEL. FOTO: CÉSAR ABAD PÉREZ, 2018



FOTO 12. VISITA A ZONA QUE FUE AFECTADA POR UN FLUJO DE DETRITOS DURANTE EL AÑO 2017. FOTO: CÉSAR ABAD PÉREZ, 2018

El mapeo participativo consistió en visitas a campo con y entrevistas que consistieron en la realización de preguntas sobre los calados, afectación y la huella máxima de la inundación. Directamente en campo, y con el apoyo de imágenes de satélite impresas, se realizó la delimitación de los diferentes eventos. Debido a que la población es predominantemente migrante que ocupó la zona desde mediados de la década de 1970, los testimonios de eventos anteriores a las inundaciones de los años 1982-1983 son casi inexistentes.

4.3.2. Identificación de evidencias de inundaciones y flujos de detritos

Se realizó un registro de estas evidencias a través de fichas de campo en fichas de campo (ver Anexo 1). Esto permitió contar con una base de datos de las diferentes evidencias geomorfológicas y efímeras encontradas en campo. Para el caso de las inundaciones, se encontraron evidencias de márgenes erosionados (Foto 13), depósitos de las inundaciones del 2017 (Fotos 14 , 15 y 16), así como también evidencias de calados a partir de flotantes ligeros que aún se encuentran visibles (foto 17).



FOTO 13. MÁRGENES RECIENTEMENTE EROSIONADOS EN EL AÑO 2017. FOTO: CÉSAR ABAD PÉREZ, 2018



FOTO 14. ZONA INUNDADA EL AÑO 2017. FOTO: CÉSAR ABAD PÉREZ, 2018



FOTO 15. ROCAS Y TRONCOS DEPOSITADOS POR LAS INUNDACIONES DEL AÑO 2017. FOTO: CÉSAR ABAD PÉREZ, 2018



**FOTO 16. DEPÓSITO DE INUNDACIÓN DEL AÑO 2017 DONDE SE VIENE REALIZANDO ACTIVIDAD AGRÍCOLA.
FOTO: CÉSAR ABAD PÉREZ, 2018**



**FOTO 17. FLOTANTES LIGEROS QUE INDICAN EL CALADO DE LA INUNDACIÓN DEL AÑO 2017. FOTO: CÉSAR
ABAD PÉREZ, 2018**

También se realizó el registro fotográfico de sedimentos para su posterior procesamiento con el software Digital Gravelometer (Foto 18). Adicionalmente, se realizó la verificación de la situación de las obras de protección implementadas después del año 2017 (Foto 19).



FOTO 18. REGISTRO DE DETALLE DE SEDIMENTOS PARA PROCESAMIENTO. FOTO: CÉSAR ABAD PÉREZ, 2018



FOTO 19. DIQUES DE TIERRA EROSIONADOS POR LAS CRECIDAS DEL AÑO 2018. FOTO: CÉSAR ABAD PÉREZ, 2018

En el caso de los conos aluviales, se identificó evidencias morfológicas y culturales de la posibles dinámica de los mismos (Foto 20), así como también se encontró evidencia material prehispánica que brinda algunas pistas de la posible actividad geodinámica (Fotos 21 y 22). También se visitó las zonas afectadas por flujos de detritos para el registro correspondiente. En base a este recorrido, se concluyó que las cuencas torrenciales no aportan material que contribuya a las crecidas del río Casma.



FOTO 20. DEPÓSITOS ESTABLES A LA DERECHA, Y CAUCES ACTIVOS DEL CONO ALUVIAL DE LA QUEBRADA PAMPA DE LAS LLAMAS.



FOTO 21. CAMINO PREHISPÁNICO



FOTO 22. CERÁMICA PREHISPÁNICA

4.3.3. Recopilación de información secundaria e instrumentos de gestión

Se realizó la visita a diferentes instituciones locales para la búsqueda de información secundaria. Específicamente, se visitó la Municipalidad Provincial de Casma, la Junta de Regantes, la Dirección Regional Agraria, la Agencia Local de Agua y la Oficina de Defensa Civil.

4.4. Método aplicado para el análisis geomorfológico-histórico en el medio fluvial

4.4.1. Análisis histórico

El análisis histórico comprendió a su vez dos momentos: el estudio evolutivo del medio fluvial y el análisis de inundaciones históricas.

El estudio evolutivo del medio fluvial se basa en la utilización de referencias históricas. Para ello se trabajó principalmente con información de sensores remotos, más específicamente con fotografías aéreas e imágenes de satélite, las mismas que se muestran en la Tabla 4.

En función a las fuentes identificadas, se realizó también una búsqueda de referencias históricas impresas, como periódicos, pero no fue posible conseguir esta información. Después de esta primera identificación de fuentes, se procedió a generar la cartografía base; para ello se realizó la recopilación de información oficial de diversas instituciones. La cartografía base fue generada a la escala 1/25000 y cuenta con las siguientes capas de información:

- Modelo de elevación de digital LIDAR del año 2017 del Proyecto Arqueológico Chankillo.
- Red vial del Ministerio de Transportes y comunicaciones del año 2017.
- Centros poblados del Instituto Nacional de Estadística e Informática del año 2017.
- Pozos tubulares de la Agencia Local del Agua del año 2017.
- Canales agrícolas de la Agencia Local del Agua del año 2017.
- Límites de parcelas agrícolas de la Agencia Local del Agua del año 2017.

La cartografía base permitió contar con una referencia para la corrección geométrica de las fotografías aéreas. Las fotografías aéreas del año 1961 fueron adquiridas en la Dirección de Vigilancia y Reconocimiento Aéreo de la Fuerza Aérea del Perú (DIVRA), y fueron ortorectificadas

con el software PCI Geomatica usando como referencia geométrica el DEM LiDAR del año 2017, así como las imágenes SPOT del año 2017 (ver Figura22).

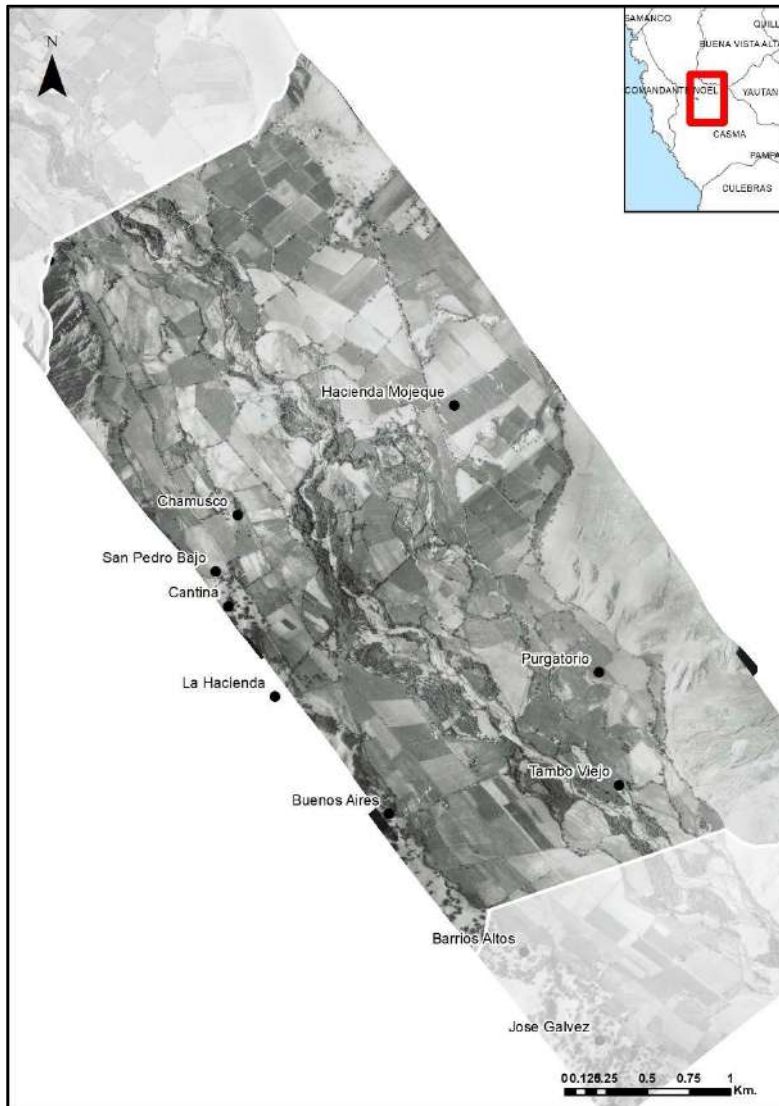


FIGURA 22. ORTOFOTO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Para el caso de las imágenes de satélite, estas fueron descargadas de las plataformas Glovis (<https://glovis.usgs.gov/>) y Earth Explorer (<https://earthexplorer.usgs.gov/>), de acuerdo a la disponibilidad de imágenes. Posteriormente se realizó la unión de bandas espectrales y se verificó el error geométrico. En algunos pocos casos se tuvo que realizar algunas correcciones geométricas

de las imágenes con el software ArcGIS. Se realizó la corrección atmosférica usando el modelo "Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Hypercube" (FLAASH) del software ENVI (ITT Visual Information Solutions, 2009).

Posteriormente se realizó el mapeo multitemporal de cauces históricos a través de interpretación visual de las imágenes de satélite y las fotografías aéreas. Debido a que la mayoría de imágenes de satélite no coincidían con el año o mes de la inundación, no fue posible generar índices y transformaciones de las imágenes de satélite, excepto para el año 2017, contándose con imágenes Sentinel-2 del mismo mes de la inundación. En este caso se generó un índice de agua a través del método Gao (Baig et al., 2013), que consiste en un índice de diferencia normalizada entre la banda del infrarrojo cercano (IRC) y la banda infrarroja de onda corta.

Se procesó todas las imágenes de la tabla 4; sin embargo, algunas de ellas no podían ser usadas por problemas como la nubosidad y el bandeo. Finalmente, las fechas para las que se realizó el mapeo fueron las siguientes: 1966, 1972, 1975, 1984, 1998 y 2017, las mismas que están relacionadas con algunos eventos de mayor caudal, según lo mostrado en la tabla 5.

Para el mapeo se realizó un análisis visual de cambios entre una fecha anterior al evento, y una posterior. Esto permitió evidenciar algunos elementos en la imagen que permitieron interpretar la inundación, como depósitos de sedimentos, cambios en la vegetación., etc., teniendo en cuenta el contexto de cada una de estas evidencias, y complementadas con la información recogida en campo. Esto permitió obtener resultados con una buena aproximación.

TABLA 5. FUENTES DE INFORMACIÓN USADAS PARA EL MAPEO. ELABORACIÓN PROPIA

AÑO DE MÁXIMA DESCARGA	CAUDAL (m3/seg)	FUENTE PARA EL MAPEO
1961	135	Ortofoto de 1966
1972	140	Imágenes Landsat de 1972 y 1975
1982	80	Imágenes Landsat de 1979 y 1984
1998	410	Imágenes Landsat de 1997, 1998 y 1999
2017	No se cuenta con la información	Imágen Sentinel-2 de 2017, imágenes de Google Earth

Adicionalmente a la interpretación de las zonas inundadas, se realizó una interpretación más detallada en dos condiciones: cauce en condiciones naturales, y cauce con modificaciones antrópicas. Se eligió para ello los años 1966 y 2017. La leyenda utilizada para la interpretación de los cauces históricos fue la siguiente:

- Canal de aguas bajas.
- Zona ribereña.
- Zona con alta actividad fluvial.
- Cauce antiguo no activo.
- Llanura aluvial.

También se realizó un análisis del uso de la tierra y de la presencia de bosques ribereños para analizar la influencia de los mismos en la dinámica fluvial. Los bosques fueron mapeados a partir de la interpretación visual de las imágenes de satélite y la ortofoto.

4.4.2. Análisis geomorfológico

Según el SNCZI (Martínez & Fernández, 2011), el análisis geomorfológico tiene como objetivo definir unidades inundables en relación a su diferencia de altura con el cauce, basadas en las evidencias de inundabilidad reciente, para luego plantear una correspondencia con el modelamiento hidráulico, que en este caso no se realizará, pues se hará la propuesta en base al método de huellas de inundación definidas en la normativa peruana (Autoridad Nacional del Agua, 2016). Las observaciones geomorfológicas permitirán definir el dominio público hidráulico probable. Permite también combinar el análisis geomorfológico con el análisis histórico.

El análisis se basa en las evidencias efímeras, evidencias topográficas y el archivo sedimentario, información obtenida a partir del trabajo de campo, las fuentes secundarias y el análisis cartográfico.

Una de las principales fuentes de información utilizadas para este análisis, aparte de la evidencia de campo, fue la información morfométrica, pues esta permite identificar elementos poco reconocibles en campo. Aparte de la información morfométrica ya explicada anteriormente, se generó un modelo de elevaciones relativas sobre la superficie de agua a partir del MDE LiDAR, el mismo que permite mapear con precisión unidades inundables en relación a su diferencia de altura con el cauce.

En este modelo, la superficie de agua representa el cauce activo actual, y las superficies relativas están en relación a la sección transversal del río, y brinda una ventaja bastante significativa respecto al modelo de elevación digital convencional, pues permite una delineación más precisa de barras y terrazas fluviales (ver Figura 23). Para su elaboración se utilizó el método propuesto por el

Departamento de Ecología del Estado de Washington (GeoEngineers, 2013), que consiste en los siguientes pasos:

- a) Creación de secciones transversales a partir del DEM LiDAR.
- b) Determinación de elevación mínima del cauce actual a las secciones transversales.
- c) Creación de modelo TIN y raster de la superficie de agua.
- d) Cálculo final del modelo de elevaciones relativas sobre la superficie del agua.

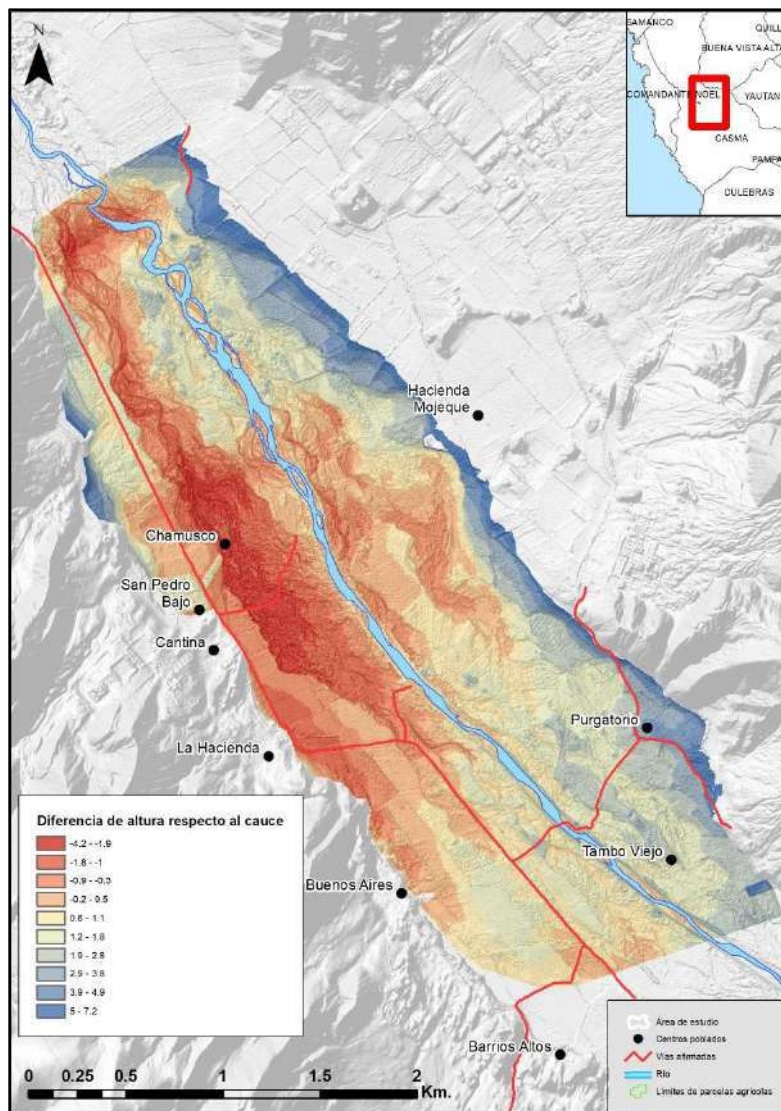


FIGURA 23. MODELO DE ELEVACIONES RELATIVAS SOBRE LA SUPERFICIE DE AGUA

En base a esta información, a las imágenes de satélite, e información de campo, fue posible elaborar un mapa geomorfológico que presenta las unidades inundables en condiciones naturales.

4.4.3. Análisis geomorfológico-histórico

Teniendo en cuenta la necesidad de basarnos en la normativa peruana, se realizaron algunas modificaciones al SNCZI; para ello, en el análisis geomorfológico-histórico se realizó la delimitación más precisa de los cauces y riberas, así como también la identificación de la zona de flujo preferente y la estimación de la inundabilidad.

4.5. Análisis de instrumentos y medidas de gestión

En base a los resultados del análisis geomorfológico-histórico, se hizo un contraste con la información recopilada en diversas instituciones, y a las entrevistas realizadas a representantes de las mismas. Esto, con la finalidad de analizar las fortalezas y debilidades institucionales, y con la finalidad de luego hacer algunas recomendaciones para la gestión, teniendo en cuenta las posibles limitaciones del presente trabajo. Las medidas de gestión que se analizaron son:

- Instrumentos de planificación territorial.
- Delimitación de la faja marginal.
- Medidas estructurales.

5. Resultados y discusión

5.1. Las inundaciones históricas

Se analizaron 5 episodios de inundación, de los cuales, el del FEN 1997-1998 presentó un caudal equivalente a un periodo de retorno mayor a 200 años. Para el caso del año 2017 no se cuenta con información del caudal; aunque según los testimonios de los agricultores, fue muy parecido al del año 1998.

TABLA 6. PRINCIPALES INUNDACIONES HISTÓRICAS ENTRE 1961 Y 2017. ELABORACIÓN PROPIA

AÑO DE MÁXIMA DESCARGA	CAUDAL (m3/seg)	PERIODO DE RETORNO APROXIMADO	SUPERFICIE INUNDADA TOTAL (ha)	AFECTACIÓN	ENVERGADURA
1961	135	Cerca de 25 años	205	Afectación a cultivos	Máxima crecida
1972	140	Cerca de 25 años	211.85	Afectación a cultivos	Máxima crecida
1982	80	Menos de 25 años	238.4	Afectación a cultivos	Máxima crecida
1998	410	Mayor a 200 años	443	Cultivos y centros poblados	Crecida excepcional
2017	Sin la información		266	Afectación a cultivos y centros poblados	Máxima crecida o crecida excepcional

Como se puede observar en la tabla 6, el evento de mayor caudal, y que causó mayor afectación fue el del FEN 1997/1998; según los entrevistados, generó una gran afectación principalmente porque obligó a muchas familias que vivían dispersas a concentrarse en los actuales centros poblados. Como puede observarse en la Figura 24, en el año 1998 hubo una extensión bastante considerable del área inundada, cubriendo gran parte de la planicie aluvial.

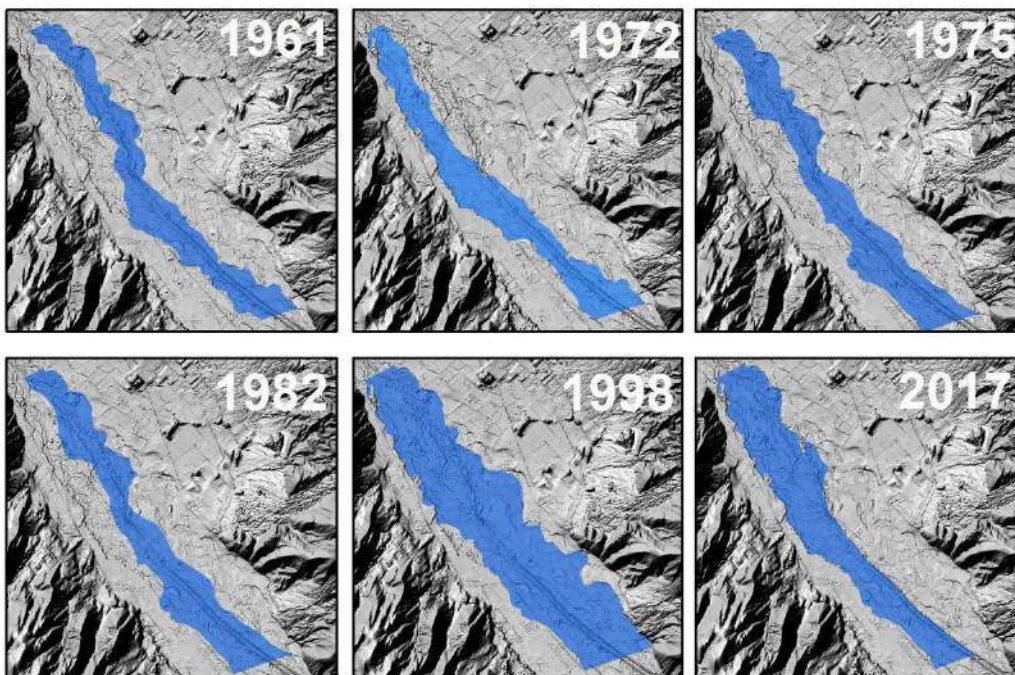


FIGURA 24. MAPEO EVOLUTIVO EN TRAMO SELECCIONADO. ELABORACIÓN PROPIA

En el año 2017 hubo una clara tendencia hacia la margen izquierda izquierdo, apareciendo también un patrón recto hacia la margen derecha del área inundada. La figura 25 nos permite analizar con mayor detalle las frecuencias de las inundaciones. Como puede observarse, las mayores frecuencias se encuentran más concentradas hacia el sur, excepto durante el FEN 1997/1998, cuando el río ocupó un área mayor hacia el este, pero se trata de un único evento en los casos analizados. Hacia el norte, existe una tendencia del flujo de orientarse hacia la margen derecha.

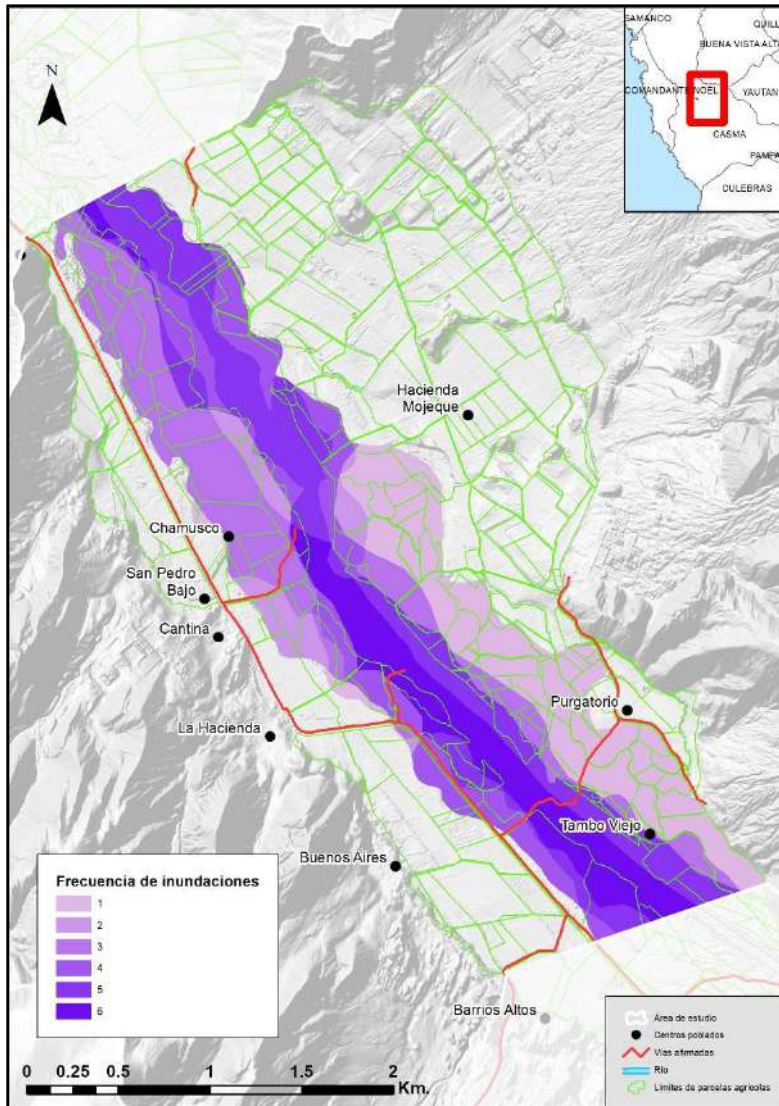


FIGURA 25. FRECUENCIA DE INUNDACIONES ENTRE LOS AÑOS 1966 Y 2017. ELABORACIÓN PROPIA

Fue necesario buscar las posibles explicaciones a estos cambios, analizando el proceso de ocupación y las intervenciones para en el río; para ello, primero veremos el caso del mapeo de cauces para los años 1966 y 2017; puesto que estos corresponden a dos situaciones bastante distintas. El cauce del año 1966 es un cauce aparentemente natural, al menos en términos de medidas estructurales, mientras que el cauce del año 2017 es un cauce con condiciones alteradas por la construcción de diques longitudinales a partir del año 2010.

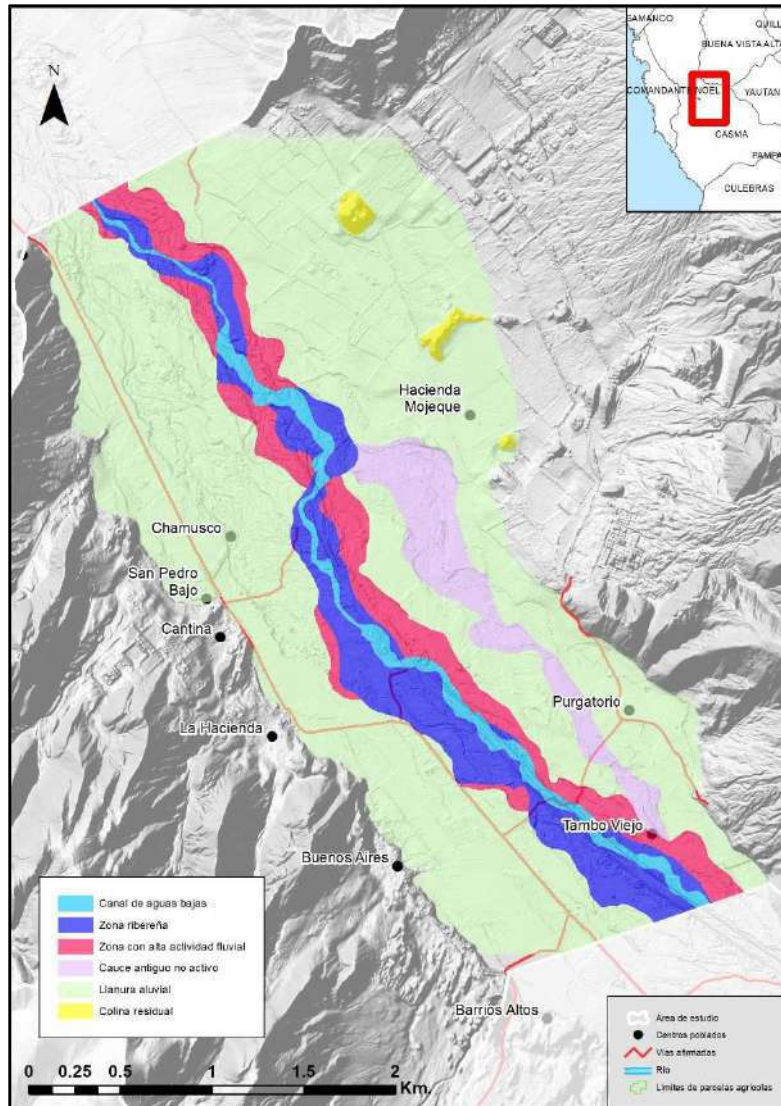


FIGURA 26. ANÁLISIS DEL CAUCE PARA EL AÑO 1966. ELABORACIÓN PROPIA

En el año 1966 no existían obras de protección de riberas. Tal como se puede observar en la figura 27, la zona ribereña sigue casi la misma dirección que las frecuencias 5 y 6 de inundaciones en la figura 25, ocupando casi el mismo ancho. Estas frecuencias comprenden el canal de aguas bajas la zona ribereña y la zona de alta actividad fluvial. El denominado cauce antiguo no activo fue un cauce que fue ocupado por el flujo de inundación el año 1998, pudiendo tratarse del lecho mayor excepcional. Obsérvese la diferencia entre el canal de aguas bajas del año 1966 y el del año 2017 (Figura 28). Esto se debe a la presencia de un dique longitudinal que fue construido a partir del año 2011, y que colapsó varias veces, pues era solo de tierra.

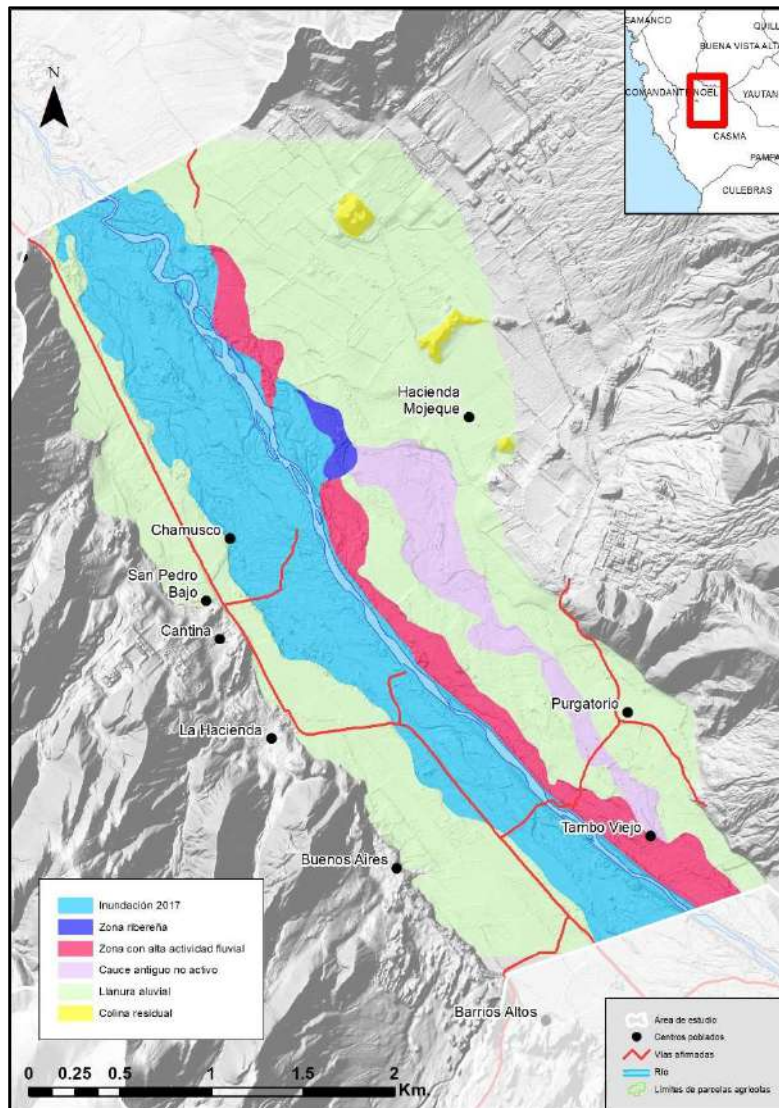


FIGURA 27. ANÁLISIS DEL CAUCE PARA EL AÑO 2017. ELABORACIÓN PROPIA

Como puede observarse en el mapa del año 2017, esta obra de protección afectó significativamente la hidráulica del río, obligando al flujo a recuperar un antiguo cauce que se había activado en los años 1975 y 1998. En la actualidad se pretende reconstruir esta obra, y mejorarla con enrocado.

Esta modificación significativa del cauce entre nuestros años más distantes, nos podría hacer pensar que se trata únicamente de la influencia del dique longitudinal. Para descartar esto se realizó un análisis multitemporal del uso de la tierra y la deforestación.

En la figura 28 se puede observar el mapa de cobertura y uso actual de la tierra. La gran mancha verde claro muestra los cultivos permanentes; los mismos que están destinados para la agroexportación. En los últimos años hubo grandes inversiones agrícolas para el cultivo de frutales como palta, mango, etc. Esto ha venido generando una fuerte presión por la expansión del área agrícola, en detrimento de los cauces naturales y sus bosques ribereños asociados, generándose también una fuerte demanda por obras de protección.

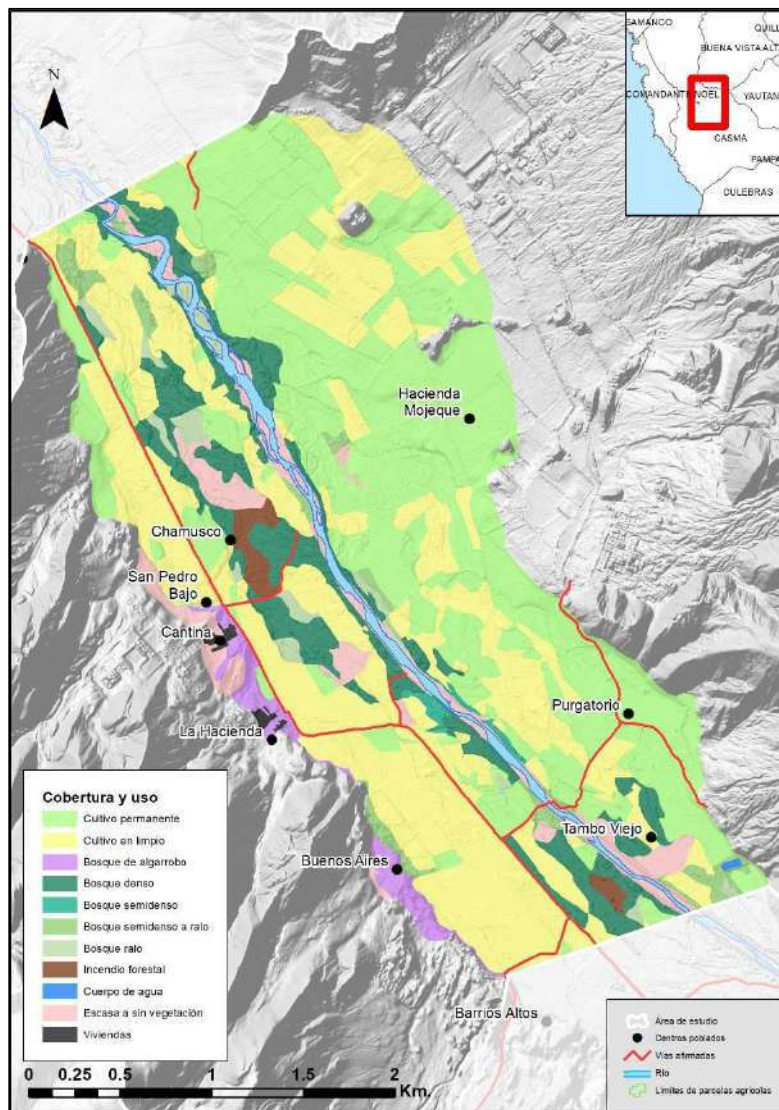


FIGURA 28. MAPA DE COBERTURA Y USO ACTUAL DE LA TIERRA 2019. ELABORACIÓN PROPIA.

La superficie actual de bosques ribereños densos en el tramo seleccionado es de 97 ha, existiendo una mayor concentración de los bosques en la zona que fue afectada por el FEN 1998 y 2017. En 1966 se tenía una superficie de 106 ha (Figura 29). A pesar de que la diferencia en la superficie de

bosque no es muy considerable entre ambas fechas, la gran diferencia entre ambas es posiblemente su distribución a lo largo del cauce. Hasta el año 1975 se mantuvo un patrón del cauce, manteniéndose un patrón trenzado, pero no siendo tan móvil.

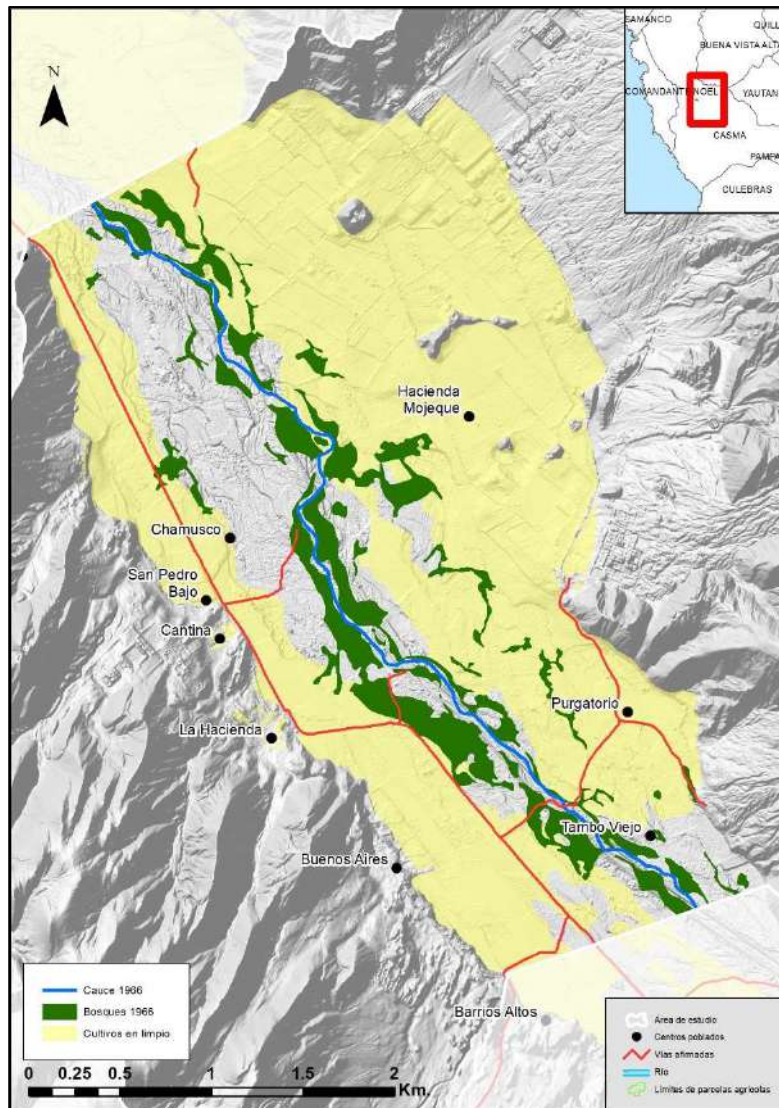


FIGURA 29. MAPA DE COBERTURA Y USO DE LA TIERRA 1966. ELABORACIÓN PROPIA

A nivel de análisis cartográfico, no se puede sacar conclusiones tan precipitadamente sobre el papel de los bosques en el cambio del patrón del flujo; sin embargo, algunas personas entrevistadas sí consideran que cumplen un papel importante en la protección contra las inundaciones. Lo que si está muy claro es el papel de los diques longitudinales en la hidráulica fluvial.

5.2. Análisis geomorfológico

El análisis geomorfológico dio como resultado 7 unidades en función a la inundabilidad. Se usó el sistema francés ya mencionado (DIREN-PACA, 2007). Como puede observarse en la figura 30, el río ha divagado por casi todo el lecho fluvial. Las unidades de inundabilidad son las siguientes:

- Lecho menor artificial

Constituye el lecho actual, el mismo que se encuentra formado por diques longitudinales enrocados que forman un canal artificial de 60 m de ancho. Cabe resaltar que este lecho se encuentra hasta 4 metros por encima de las otras unidades, debido a la acumulación de sedimentos producida por la construcción del dique, que hasta el año 2017 era predominantemente de tierra y colapsó ese mismo año en varios tramos.

- Lecho menor natural

Constituye el lecho natural que se evidencia por la mayor frecuencia de los eventos históricos, formando una serie de canales de aguas bajas donde el río divaga preferentemente.

- Lecho medio

Terrazas de 1.5 a 3 m en relación al cauce actual del río.

- Lecho medio negativo

Se trata de terrenos inundables que se encuentran entre 1.4 y 4 metros por debajo del lecho menor artificial.

- Terraza alta

Terrenos que se encuentran por encima de los 2.8 metros en relación al cauce actual del río. No existen evidencias morfológicas de inundaciones ni paleocauces.

- Lecho mayor excepcional probable

Son terrazas que se encuentran a la margen izquierda del río, y a una altura por encima de los 2 m de las zonas de inundación recientes. No presentan evidencias de inundaciones desde la década de 1960, pero posiblemente se debe a que fueron disturbados por la actividad agrícola.

- Lecho mayor

Se encuentran hacia la margen derecha del río, y se ven afectados en eventos excepcionales, como las relacionadas por el FEN 1997/1998.

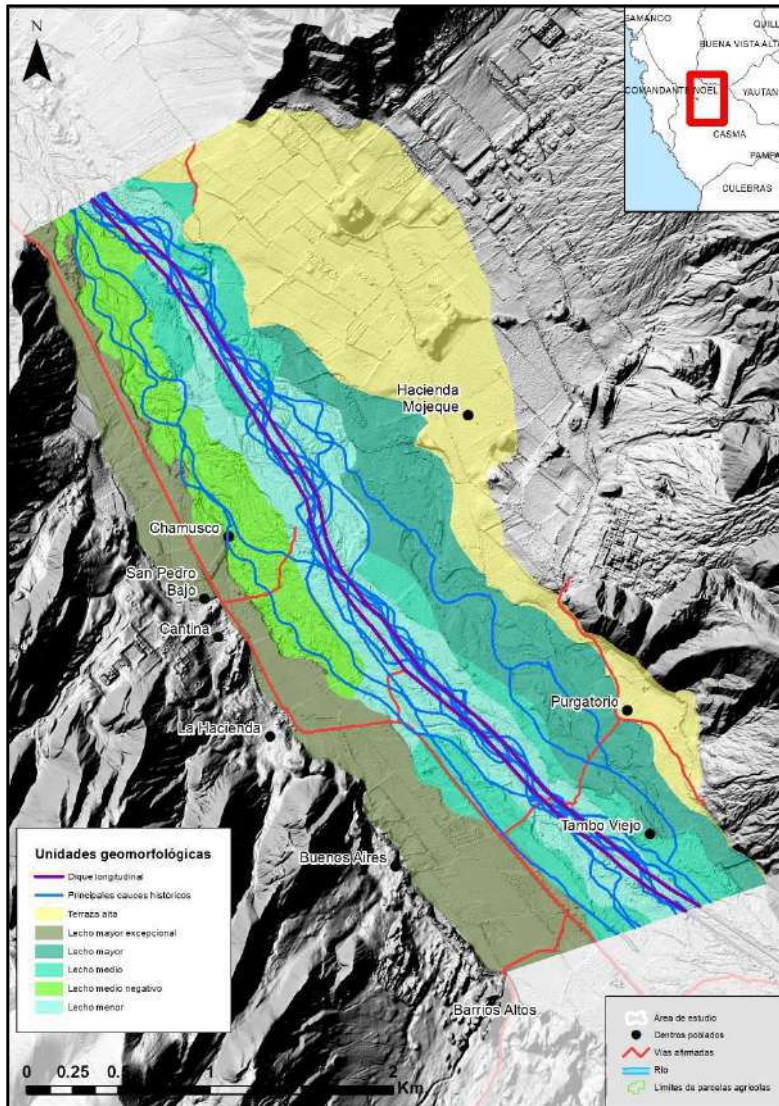


FIGURA 30. MAPA GEOMORFOLÓGICO. ELABORACIÓN PROPIA.

5.3. Análisis geomorfológico-histórico

En base al análisis evolutivo, y a la geomorfología, se realizó la zonificación de peligros, así como la identificación del límite superior de la ribera. El reglamento de delimitación de fajas marginales establece el método de modelamiento hidráulico y el de huellas máximas.

El método de huellas máximas consiste en identificar las huellas máximas dejadas por el agua en periodos de máxima creciente, en avenidas ordinarias. Lamentablemente, la normativa no especifica claramente a qué se refiere con avenidas ordinarias.

Debido a las imprecisiones ya señaladas, se está asumiendo como avenidas máximas ordinarias el caudal estimado para periodos de retorno de 25 años, que es de 183.29 m³/seg. Los eventos de 1961, 1972 y 1982 están por debajo de este caudal; sin embargo, son los más cercanos en relación a las inundaciones de 1998.

Según esto, la clasificación de peligros es la siguiente (ver figura 31):

- Muy alto

Representado por el lecho menor artificial y el lecho menor natural. Se encuentra dentro del periodo de retorno de 25 años.

- Alto

Se encuentra también dentro del periodo de retorno de 25 años, pero abarca también las terrazas que constituyen el lecho medio.

- Medio

Abarca terrenos que se encuentran muy significativamente por debajo del nivel del río, habiendo ocurrido inundaciones en los mismos, tanto en avenidas con un periodo de retorno menor a 25 años, como con mayores caudales.

- Bajo

Comprenden terrenos inundados durante eventos con un periodo de retorno de más de 50 años (como el FEN de 1998).

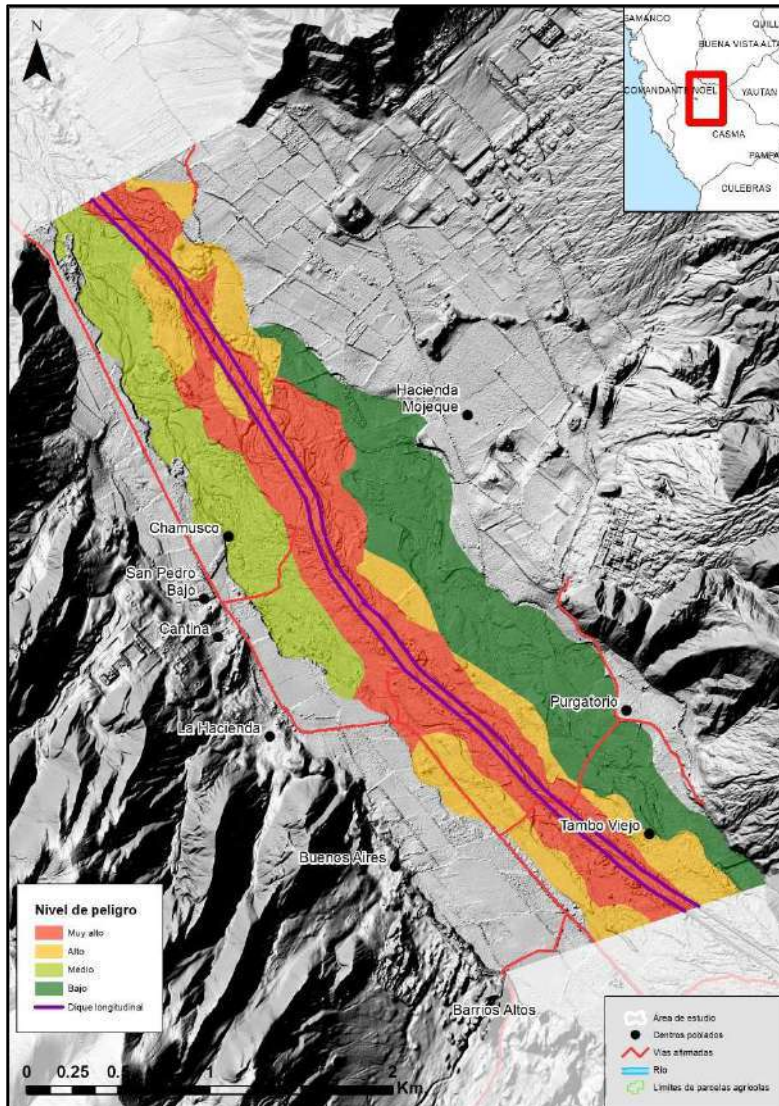


FIGURA 31. PELIGROS POR INUNDACIONES. ELABORACIÓN PROPIA

El límite superior de la ribera estaría representado por los niveles muy alto y alto, puesto que están en relación al periodo de retorno muy alto y alto, y también muestran evidencias de la huella máxima del río.

5.4. Medidas de gestión implementadas

En el año 1999 (después del ENSO 1998), se delimitó la faja marginal (Administración Técnica del Distrito de Riego Nepeña-Casma-Huarmey, 1999), teniendo como uno de sus objetivos la “conservación de las áreas agrícolas y la prevención de desastres, así como determinar un área intangible”. A nivel de la normativa sobre fajas marginales, estas deberían corresponder con el límite del máximo nivel extraordinario; en este caso se determinaron las descargas máximas para un periodo de retorno de 25 años obviando las inundaciones que ocurrieron el año anterior, tal como puede observarse en la figura 4. En este caso, no se consideró el evento de 1998 para delimitar la faja marginal, sino un caudal de 180 m³/seg incluso se implementaron diques longitudinales de tierra para la protección del área agrícola, diques que colapsaron el año 2017 y en la actualidad vienen siendo reconstruidos.

Tal como se observa en la figura 32, existe la faja marginal delimitada, resultado del método hidráulico, y el límite de ribera, que es producto del presente trabajo, tienen varias coincidencias.

La norma peruana, a diferencia de la española, no ha previsto aún la articulación del método hidráulico con el método de huellas máximas, siendo necesario realizar un avance en este sentido.

A pesar de la diferencia en la delimitación de la faja marginal, es importante ver su impacto en términos de gestión, pues debería limitar la ocupación agrícola. Tal como se ve en el mapa, hay muchas áreas agrícolas dentro de la faja marginal, pudiendo ser una evidencia del escaso cumplimiento regulatorio de los usos, puesto que la presencia de áreas agrícolas pone en riesgo el desarrollo de la vegetación ribereña.

También es necesario analizar el impacto de los diques longitudinales, dado que, están influyendo significativamente en el comportamiento hidráulico del río, tal como se ha evidenciado en el año

2017. También generando una posible falta sensación de seguridad hacia los agricultores, debido a que posiblemente no podría contener caudales como los del año 1998 o 2017.

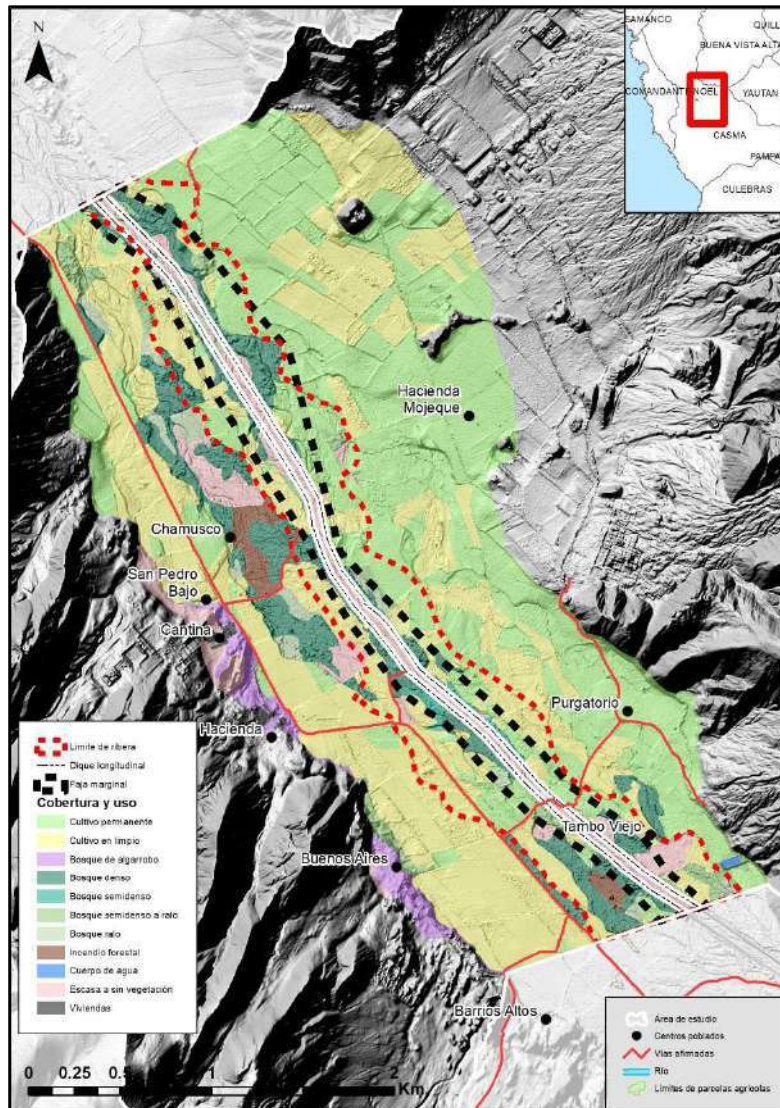


FIGURA 32. MEDIDAS DE GESTIÓN IMPLEMENTADAS. ELABORACIÓN PROPIA

6. Conclusiones y recomendaciones

6.1. Conclusiones

- No hay influencia de la actividad torrencial en el tramo seleccionado, pues los abanicos aluviales activos no depositan material en la zona de actividad del río.
- El río presenta un patrón trenzado, y se pudo identificar las zonas que fueron inundadas en 6 eventos de inundación, existiendo zonas con mayor frecuencia de las inundaciones, a partir de las cuales fue posible también identificar unidades geomorfológicas, las mismas que muestran actualmente evidencias morfológicas para su delimitación. También fue posible identificar niveles de peligro en función a la relación entre unidades geomorfológicas y las máximas avenidas relacionadas a diferentes periodos de retorno.
- La construcción del dique longitudinal ha influido significativamente en el comportamiento hidráulico del río, lo que influyó en que las zonas que se encuentran hacia la margen izquierda del río sean más afectadas en el año 2017.
- La faja marginal del río, delimitada el año 1999, presenta muchas coincidencias con el límite de la ribera del río; sin embargo, la faja marginal, identificada a partir del método hidrológico-hidráulico, tiende a subestimar el área inundable.
- Existe ocupación agrícola dentro de la faja marginal, lo que evidencia poco control sobre los usos que deberían ser regulados dentro de la misma.

6.2. Recomendaciones

- Es necesario redimensionar la faja marginal en algunos tramos, con la finalidad de mejorar la gestión del cauce actual, así como también garantizar la conservación de los bosques ribereños.

- Es necesario redimensionar los diques longitudinales, debido a que los mismos podrían no tener la capacidad de los eventos de gran magnitud, existiendo también una tendencia de sedimentación de los mismos.
- Se debe hacer un tratamiento integral de al menos la zona comprendida en la ribera del río, lo que implica la restauración del río, así como lograr acuerdos para tener la menor intervención posible, buscándose también mecanismos de compensación para los agricultores que podrían verse afectados.

7. Referencias bibliográficas

- Administración Técnica del Distrito de Riego Nepeña-Casma-Huarmey. (1999). *Delimitación de la faja marginal del río Casma*. Lima-Perú: Ministerio de Agricultura.
- Apaclla Nalvarte, R. (2010). *Estudio de máximas avenidas en las cuencas de la zona centro de la vertiente del Pacífico*: Autoridad Nacional del Agua.
- Apéstegui, J., Macharé, J., Takahashi, K., Sifeddine, A., & Ortieb, L. (2015). El Fenómeno El Niño durante el último milenio. *Generación de información y monitoreo del Fenómeno El Niño*, Vol. 2 N° 2.
- Apéstegui, J., & Takahashi, K. (2016). Registros paleoclimáticos de El Niño en el holoceno. *Generación de información y monitoreo del Fenómeno El Niño*, Vol. 3 N° 2.
- Reglamento para la delimitación y mantenimiento de fajas marginales en cursos fluviales y cuerpos naturales y artificiales, Resolución Jefatural N° 332-2016-ANA C.F.R. (2016).
- Autoridad Nacional del Agua. (2019). Visor Geohidro. Retrieved from <http://geo.ana.gob.pe/geohidro/>
- Aybar, C., Lavado-Casimiro, W., Huerta, A., Fernández, C., Vega, F., Sabino, E., & Felipe-Obando, O. (2017). *Uso del Producto Grillado "PISCO" de precipitación en Estudios, Investigaciones y Sistemas Operacionales de Monitoreo y Pronóstico Hidrometeorológico, Nota Técnica 001 SENAMHI-DHI-2017*. Retrieved from
- Baig, M. H. A., Zhang, L., Wang, S., Jiang, G., Lu, S., & Tong, Q. (2013). *Comparison of MNDWI and DFI for water mapping in flooding season*. Paper presented at the Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2013 IEEE International.
- Ballarín Ferrer, D., & Rodríguez Muñoz, I. (2013). *Hidromorfología fluvial. Algunos apuntes aplicados a la restauración de ríos en la cuenca del Duero*.
- Bischof, H. (2009). Los periodos Arcaico Tardío, Arcaico Final y Formativo Temprano en el valle de Casma: evidencias e hipótesis. *Boletín de Arqueología PUCP*(13), 9-54.
- CENEPRED. (2014). Manual de evaluación de riesgos originados por inundaciones fluviales (pp. 48). Lima - Perú: Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres.
- Congreso de la República. (2009). *Ley de recursos hídricos*. Lima, Perú: El Peruano.
- Ley que aprueba disposiciones de carácter extraordinario para las intervenciones del gobierno nacional frente a desastres y que dispone la creación de la Autoridad para la Reconstrucción con Cambios Ley N° 30556 C.F.R. (2017).
- Dewitte, B., Takahashi, K., Goubanova, K., Montecinos, A., Mosquera, K., Illig, S., . . . Espinoza, J. (2014). Las diversas facetas de El Niño y sus efectos en la costa del Perú.
- DIREN-PACA. (2007). *L'approche hydrogéomorphologique en milieux méditerranéens*: Direction Régionale de l'Environnement Provence-Alpes-Côte d'Azur, Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de l'Aménagement du territoire.
- French, A., & Mechler, R. (2017). Managing El Niño Risks Under Uncertainty in Peru: Learning from the past for a more disaster-resilient future.
- GeoEngineers. (2013). *Channel Migration Assessment. Clallam County*: Department of Ecology State of Washington.
- Ghezzi, I., & Gómez, E. G. (2015). Evidencias geológicas en el Complejo Astronómico Chankillo (Casma, Áncash). *Revista del Instituto de Investigación de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica*, 16(31).
- Ghezzi, I. A. (2016). *Chankillo as a fortification and late Early Horizon (400-100 BC) warfare in Casma, Peru*: Yale University.

- Huarac, J. T. (2011). *Estudio de Pre Inversión a Nivel de Perfil del Proyecto: "Adecuación del Proyecto Original Chinecas al Esquema Reestructurado"*.
- INRENA. (2007a). *Estudio hidrológico en la Cuenca del río Casma*.
- INRENA. (2007b). *Inventario de fuentes de agua superficial en la cuenca del río Casma*.
- ITT Visual Information Solutions. (2009). *Atmospheric Correction Module: QUAC and FLAASH User's Guide* (pp. 44). Retrieved from http://www.harrisgeospatial.com/portals/0/pdfs/envi/flaash_module.pdf
- Martínez, F. S., & Fernández, J. L. (2011). *Guía metodológica para el desarrollo del Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables*. Madrid: Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino.
- MINAM. (2015). *Mapa de susceptibilidad física del Perú: zonas propensas a inundaciones y deslizamientos en la costa y sierra, frente a la ocurrencia de eventos hidrometeorológicos extremos* Lima-Perú: Ministerio del Ambiente, Dirección General de Ordenamiento Territorial.
- Ministerio de Economía y Finanzas. (2013). *Guía simplificada para la identificación, formulación y evaluación social de proyectos de inversión pública de servicios de protección frente a inundaciones, a nivel de perfil*. Lima-Perú: Ministerio de Agricultura.
- Ministerio de la Presidencia. (2008). *Real Decreto 9/2008, de 11 de enero, por el que se modifica el Reglamento del Dominio Público Hidráulico, aprobado por el Real Decreto 849/1986, de 11 de abril*. España.
- Municipalidad Provincial de Casma. (2017a). *Plan de Acondicionamiento Territorial de la Provincia de Casma 2017-2037*. Casma-Perú.
- Municipalidad Provincial de Casma. (2017b). *Plan de Manejo del Complejo Arqueoastronómico de Chankillo*. Casma-Perú.
- Ojeda Couchoud, M., Sovero Sovero, H. F., Vargas, R., Pacha Vicente, C., & Pernas Canadell, J. (2015). *Perfil de riesgo por inundaciones en Perú* (Vol. 844): Banco Interamericano de Desarrollo.
- Pozorski, S., & Pozorski, T. (1998). La dinámica del valle de Casma durante el Periodo Inicial. *Boletín de Arqueología PUCP*(2), 83-100.
- Pozorski, S., & Pozorski, T. (2006). *Early settlement and subsistence in the Casma Valley, Peru*: University of Iowa Press.
- Sánchez Fernández, A. W., Molina Galdos, O., & Gutiérrez Abanto, R. (1995). *Geología de los cuadrángulos de Chimbote, Casma y Culebras 19-f, 19-g, 20-g*—[Boletín A 59]. INGEMMET.
- SENAMHI. (2014). *El Fenómeno El Niño en el Perú*. Lima-Perú: Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú.
- Valvidia Romero, A., & Gamarra, I. (2008). Atlas Eólico Del Perú. Lima: Ministerio De Energía y Minas Dirección General de electricacion rural direccion de Fondos Concursables.
- Zavala Carrión, B. L., Luque Poma, G., Valderrama Murillo, P. A., Barrantes Huamán, R., & Pari Pinto, W. (2009). *Riesgos geológicos en la región Ancash* - [Boletín C 38]. Lima-Perú: Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico.
- Zavaleta, M. E. C. (2016). *Modelo hidrogeológico numérico del Valle de Casma*. Retrieved from

8. Anexos

ANEXO 1. FICHA DE REGISTRO DE CAMPO

ANÁLISIS GEOMORFOLÓGICO-HISTÓRICO DEL VALLE DE SAN RAFAEL – CUENCA DEL RÍO CASMA, PERÚ

SECTOR		
FECHA		ALTITUD
COORDENADAS	X	Y
UNIDAD GEOMORFOLÓGICA		
EVIDENCIAS DE INUNDACIONES		
TIPO DE EVIDENCIA		
CALADO		
AFECTACIÓN		
INTERVENCIÓN ANTRÓPICA		
SEDIMENTOS		
EVIDENCIAS DE FLUJO DE DETRITOS		
TIPO DE EVIDENCIA		
EVIDENCIA CULTURAL		
SEDIMENTOS		
FOTOS		