



**MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS  
DIRECCIÓN DE OBRAS HIDRÁULICAS**

**DIAGNÓSTICO DE LA SITUACIÓN DE RIESGO GEOFÍSICO EN  
QUEBRADAS LATERALES A LOS CAUCES DE LAS QUEBRADAS  
DE CAMIÑA Y TARAPACÁ**

**INFORME FINAL  
RESUMEN EJECUTIVO**

**SEPTIEMBRE 2013**



**fcfm**

FACULTAD DE CIENCIAS  
FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
UNIVERSIDAD DE CHILE

**ldiem**<sup>®</sup>  
UN SIGLO DE CONFIANZA Y RESPALDO



**fcfm**

FACULTAD DE CIENCIAS  
FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
UNIVERSIDAD DE CHILE

**Idiem**<sup>®</sup>  
UN SIGLO DE CONFIANZA Y RESPALDO

SEI – INFORME

INFORME N° 762.474-00

**DIAGNÓSTICO DE LA SITUACIÓN DE RIESGO EN QUEBRADAS LATERALES A LOS CAUCES  
DE LAS QUEBRADAS DE CAMIÑA Y TARAPACÁ**

INFORME FINAL

INFORME EJECUTIVO

REVISIÓN 1

|                                       |                               |  |   |                   |
|---------------------------------------|-------------------------------|--|---|-------------------|
| <b>SECCION ESTRUCTURAS INGENIERÍA</b> |                               | REF.: PR-SEI.2012-0064-A<br>PR-SEI.2012-0082 | EJEMPLAR N°:  | N° DE PÁGINAS: 30 |
| <b>ELABORADO POR:</b>                 | <b>REVISADO POR:</b>          | <b>APROBADO POR:</b>                         | <b>DESTINATARIO:</b>  |                   |
| IDIEM                                 | David Silva S.                | Fernando Yáñez U.                            | Dirección de Obras Públicas<br>Ministerio de Obras Públicas |                   |
| <b>FECHA :</b> 07 / 01 / 2013         | <b>FECHA :</b> 10 / 09 / 2013 | <b>FECHA :</b> 10 / 09 / 2013                | <b>FECHA :</b> 13 / 09 / 2013                               |                   |

Arica  
Iquique  
Antofagasta  
Coquimbo  
Viña del Mar  
Santiago  
Concepción  
Temuco  
[www.idiem.cl](http://www.idiem.cl)

**INDICE**

|   |           |
|---|-----------|
| <b>1. ALCANCE</b>                                   | <b>3</b>  |
| <b>2. INTRODUCCIÓN</b>                              | <b>3</b>  |
| 2.1 ANTECEDENTES GENERALES                          | 3         |
| 2.2 ÁREA DE ESTUDIO                                 | 3         |
| <b>3. METODOLOGÍA</b>                               | <b>4</b>  |
| 3.1 GEOLOGÍA  | 4         |
| 3.2 HIDROLOGÍA E HIDRÁULICA                         | 5         |
| 3.3 TOPOGRAFÍA                                      | 5         |
| 3.4 GEOTECNIA                                       | 6         |
| 3.5 ESTRUCTURAS                                     | 6         |
| 3.6 MEDIDAS ESTRUCTURALES DE CONTROL Y/O MITIGACIÓN | 7         |
| 3.7 MAPAS DE PELIGRO                                | 7         |
| <b>4. RESULTADOS</b>                                | <b>7</b>  |
| 4.1 EVALUACIÓN GEOLÓGICA                            | 7         |
| 4.2 EVALUACIÓN HIDROLÓGICA E HIDRÁULICA             | 9         |
| 4.3 TOPOGRAFÍA                                      | 10        |
| 4.4 EVALUACIÓN GEOTÉCNICA                           | 11        |
| 4.5 EVALUACIÓN DE ESTRUCTURAS                       | 12        |
| 4.6 MEDIDAS ESTRUCTURALES DE CONTROL Y/O MITIGACIÓN | 14        |
| 4.1 MAPAS DE PELIGRO                                | 14        |
| <b>5. CONCLUSIONES</b>                              | <b>26</b> |
| 5.1 GEOLOGÍA  | 26        |
| 5.2 HIDROLOGÍA E HIDRÁULICA                         | 27        |
| 5.3 EVALUACIÓN DE ESTRUCTURAS                       | 27        |
| 5.4 MAPAS DE PELIGRO                                | 27        |
| 5.5 OBRAS DE MITIGACIÓN                             | 29        |
| 5.6 MAPAS DE PELIGRO MODIFICADOS                    | 29        |
| 5.7 SECTORES POTENCIALMENTE HABITABLES              | 30        |
| <b>6. RECOMENDACIONES</b>                           | <b>30</b> |



## DIAGNÓSTICO DE LA SITUACIÓN DE RIESGO EN QUEBRADAS LATERALES A LOS CAUCES DE LAS QUEBRADAS DE CAMIÑA Y TARAPACÁ

### 1. ALCANCE

A petición de la Dirección de Obras Hidráulicas del Ministerio de Obras Públicas, se está realizando el diagnóstico de la situación de riesgo en quebradas laterales a los cauces de las quebradas de Camiña y Tarapacá.

El estudio tiene por objetivo evaluar los riesgos asociados a eventos de crecidas y procesos de remoción en masa, en diversas quebradas laterales a los cauces de las quebradas de Camiña y Tarapacá, región de Tarapacá.

Los objetivos específicos de la consultoría son:

- a) Identificar las amenazas geológicas asociadas a eventos de crecidas y procesos de remoción en masa en los siguientes poblados:
  - Comuna de Camiña: Camiña, Yala Yala, Chapiquilita, Apamilca, Cuisama y Moquella
  - Comuna de Huará: Limacsiña, Huaviña, Mocha y Laonzana.
- b) Identificar, en el área de estudio, los sectores que son potencialmente habitables y cuáles no lo son, en función de los riesgos que presentan frente a eventos de crecida y procesos de remoción en masa.
- c) Recomendar medidas de control y mitigación que procedan, a nivel conceptual, de ser factible la localización de población.

### 2. INTRODUCCIÓN

#### 2.1 Antecedentes generales

Debido a la magnitud de los daños producidos sobre la población localizada en las quebradas laterales a los cauces de las quebradas de Camiña y Tarapacá (Comunas de Camiña y Huará respectivamente), por las crecidas de carácter aluvional ocurridas el presente año durante el periodo estival, las autoridades regionales consideraron necesario abordar, como parte de los requerimientos de la emergencia, un estudio que permita identificar y evaluar el riesgo asociado a eventos de crecida y procesos de remoción en masa, que presentan dichas quebradas para el asentamiento de poblaciones y que además, determine las medidas de control posibles de implementar, para disminuir dichos riesgos.

#### 2.2 Área de estudio

Las localidades estudiadas en esta etapa corresponden a Apamilca, Yala Yala, Chapiquilita, Camiña, Cuisama y Moquella, ubicadas en la quebrada de Camiña (Figura 2.1), y Limacsiña, Huaviña, Mocha y Laonzana en la quebrada de Tarapacá (Figura 2.2). Ambas quebradas se encuentran al noreste de Iquique.



Figura 2.1. Pueblos en estudio Quebrada de Camiña

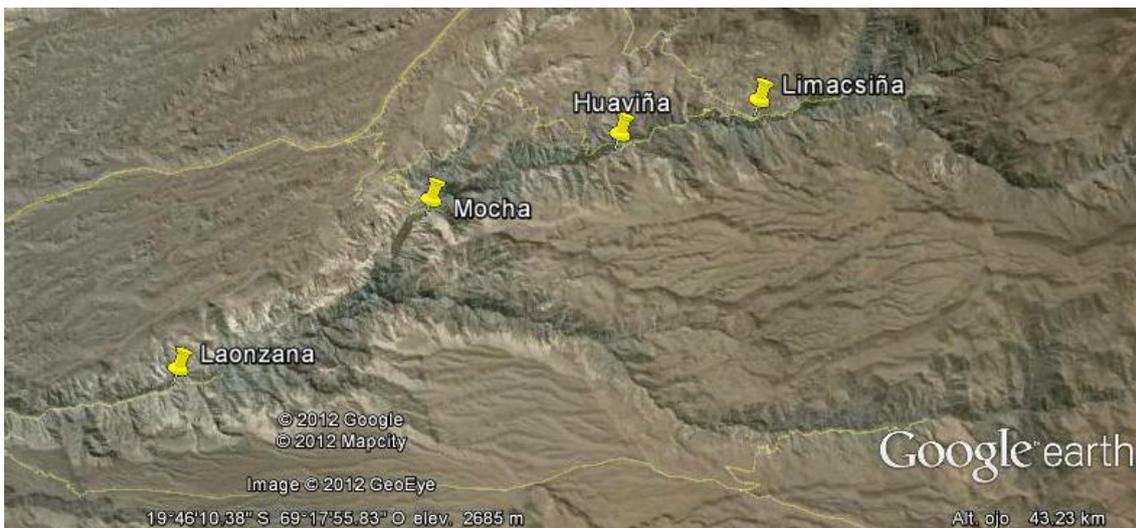


Figura 2.2. Pueblos en estudio Quebrada de Tarapacá

### 3. METODOLOGÍA

La metodología para el desarrollo de la presente consultoría se describe en términos generales a continuación.

#### 3.1 Geología

Para el desarrollo de la evaluación geológica de la presente consultoría, se revisaron críticamente los estudios disponibles de la zona. Se realizó un análisis de imágenes satelitales (Google Earth) y se elaboró un mapa preliminar de las áreas de estudio, destacando las zonas vulnerables a sufrir fenómenos de remoción en masa. Posteriormente, se realizó una visita a terreno con el fin de caracterizar las unidades geológicas y evaluar el alcance y daños generados durante los aluviones



de marzo de 2012. Con la información recopilada y las observaciones de terreno se generó un mapa geológico de la zona, destacando los flujos de marzo de 2012.

### 3.2 Hidrología e Hidráulica

Para el desarrollo de la evaluación hidrológica se empleó la siguiente metodología:

- Delimitación del área de aporte para las quebradas de estudio.
- Recopilación de registros históricos de precipitación máxima en 24 hrs.
- Análisis de frecuencia de los registros de precipitación mediante 5 distribuciones de probabilidad.
- Empleo de los métodos de precipitación-escorrentía para determinar la escorrentía asociada a diferentes períodos de retorno.
- Empleo método de Takahashi para la determinación del caudal detrítico y volumen detrítico, para diferentes períodos de retorno.

Para el desarrollo de la evaluación hidráulica se empleó la siguiente metodología:

- Selección de los perfiles transversales del eje del cauce. Manejo de información topográfica mediante el software HEC-GeoRAS 4.3.
- Mediante la información granulométrica en calicatas definidas en terreno y la visita de terreno se estima el coeficiente de rugosidad de Manning.
- Ingreso de parámetros de rugosidad, condiciones de borde, y caudales detríticos máximos asociados a diferentes períodos de retorno al software HEC-RAS. Ajuste del modelo hidráulico según condiciones de terreno.
- Obtención del eje hidráulico para el cauce modelado. Evaluación de alturas y velocidades máximas.
- Generación de mapa con las planicies de inundación. Empleo de criterios hidráulicos y geológicos.

Para el desarrollo de la evaluación de transporte de sedimentos se empleó la siguiente metodología:

- Determinación del coeficiente de forma y el coeficiente de degradación en base a información de calicatas como diámetro característico.
- Determinación del gasto sólido de fondo en base a las expresiones de: Meyer-Peter y Muller, Meyer-Peter y Muller Modificado, Parker, Cheng, Hanes, Ashida y Michiue.
- Socavación del lecho empleando la relación de Neill, y Lischtvan-Letvediev-Maza.

### 3.3 Topografía

Para los levantamientos topográficos se generó una base en cada localidad compuesta por 2 puntos auxiliares cada una, las cuales fueron medidos con tecnología GPS (Global Positioning System). Estos puntos auxiliares son utilizados como bases para instalar el instrumento de medición (estación total) de los perfiles transversales y longitudinales.

Los puntos bases son obtenidos a partir de un vértice geodésico denominado CAM 1 y que pertenece a la Dirección de Obras Hidráulicas (DOH), y que posee las siguientes coordenadas UTM. Las mediciones realizadas con GPS tuvieron una duración aproximada de 25 minutos por punto y sus coordenadas finales fueron obtenidas a través del método de post-proceso, entregando una



precisión milimétrica. Una vez generado los puntos base se realizó el levantamiento de los perfiles de las quebradas.

### 3.4 Geotecnia

Para el análisis de los flujos de origen lejano a las zonas pobladas, se realizó una inspección general a la parte superior de la cuenca donde se puedan originar flujos aluvionales de gran volumen. De esta inspección se identificaron los puntos de interés para las prospecciones por parte del equipo de geólogos e ingenieros hidráulicos. El criterio de selección de los sitios de prospección se basó en la ubicación de la quebrada respecto a viviendas y obras civiles, de manera de extraer una muestra de suelo representativa de lecho del cauce, con la menor alteración posible por movimientos de tierra realizados.

El objetivo de las calicatas fue obtener información de la curva granulométricas, y a partir de ellas estimar los diámetros característicos relevantes en el análisis hidráulico. Además, se obtuvieron muestras para la ejecución de ensayos de resistencia corte, información necesaria para los análisis de estabilidad. Por otra parte, los sondajes realizados permiten ver el espesor de los suelos existentes, en especial la potencia de los abanicos de material de aluviones y deslizamientos, además de observar el tipo de suelo que subyace a estos abanicos. También permiten determinar niveles de napas subterráneas a fin de ver su influencia en la estabilidad de laderas.

Como parte del proyecto, en la Quebrada de Camiña se realizaron en total 24 calicatas de hasta 3 [m] de profundidad y 3 sondajes de 50 [m] de profundidad cada uno. En cuanto a la Quebrada de Tarapacá, se realizaron 20 calicatas de hasta 3 [m] de profundidad y 2 sondajes de 50 [m] cada uno.

### 3.5 Estructuras

Se realizó una inspección de reconocimiento de la zona y de constatación de los tipos de construcción y niveles de daños más frecuentes, esto con el objetivo de caracterizar los indicadores de vulnerabilidad conforme a la situación local. Para el análisis de vulnerabilidad estructural relativa de las viviendas ante aluviones se han considerado dos aspectos fundamentales relacionados por una parte con el emplazamiento de las viviendas, "*Factor de exposición*" y por otra parte con las características estructurales de las viviendas, "*Vulnerabilidad física Indicativa*". El factor de exposición toma en cuenta el nivel de exposición global según la ubicación de las viviendas con respecto a la zona de posibles aluviones y también el nivel de exposición local, que contempla la posición relativa dentro de la quebrada y factores locales de exposición. La vulnerabilidad física indicativa considera básicamente la materialidad de las viviendas y su estado estructural. La materialidad tiene relación con la capacidad de resistir las sollicitaciones generadas por el aluvión y el estado estructural tiene relación con la eventual pérdida de capacidad, ya sea por un deterioro a través del tiempo o por deficiencias de diseño o constructivas. La vulnerabilidad física se determina conforme a la siguiente matriz:

| VULNERABILIDAD ESTRUCTURAL RELATIVA |           | FACTOR DE EXPOSICIÓN |       |      |
|-------------------------------------|-----------|----------------------|-------|------|
| VULNERABILIDAD FÍSICA               | CATEGORÍA | Alto                 | Medio | Bajo |
|                                     | Alto      | ALTO                 | MEDIO | BAJO |
|                                     | Medio     | ALTO                 | MEDIO | BAJO |
|                                     | Bajo      | MEDIO                | MEDIO | BAJO |



### 3.6 Medidas estructurales de control y/o mitigación

A partir de los resultados de los estudios hidráulicos, geotécnicos y estructurales para cada una de las quebradas estudiadas, se proponen obras de mitigación. La disposición de las obras se ha definido en función del mapa de peligro obtenido para la situación actual conforme a los distintos tipos de peligro (flujo, deslizamiento superficial, caída de rocas).

### 3.7 Mapas de peligro

La evaluación de peligro de remoción en masa se orientó específicamente a los fenómenos catalogados como deslizamientos superficiales y acarreos, flujos de detritos, y caídas de rocas y rodados. De acuerdo a lo observado en terreno y al estudio geológico, el peligro de deslizamientos superficiales y acarreos consiste en la remoción de mantos de suelo superficial ubicados en las laderas con espesores centimétricos a decimétricos hasta deslizamientos traslacionales de hasta unos 2 m de espesor. Los flujos de detritos o aluviones son flujos de agua con alta carga de sedimentos de tamaño variable desde bloques de roca hasta limos y arcillas que bajan por las quebradas que drenan las laderas. Las caídas de rocas y rodados incluyen desprendimientos de bloques de roca desde escarpes de alta pendiente y rodados de bloques ubicados en la superficie de las unidades de deslizamientos profundos de roca, los cuales pueden movilizarse ante condiciones de lluvia intensa o sismos.

Para la evaluación de peligro de deslizamientos y acarreos superficiales, dadas las características de los materiales y procesos, observados en terreno, se utilizó para la evaluación del peligro el modelo de análisis de estabilidad de laderas de talud infinito, elaborado en una planilla de cálculo. Los valores de resistencia del suelo se obtuvieron de los ensayos triaxiales extraídos de muestras de calicatas excavadas en laderas. La evaluación del peligro de generación de caídas de rocas y rodados se basó en los grados de susceptibilidad, donde por tratarse de materiales en equilibrio, el hecho de que sea susceptible condiciona directamente el peligro. A esto se adicionó el análisis del alcance que pueden tener los bloques más allá de la zona de generación. El modelamiento del alcance se realizó mediante el uso del software Rocfall, de Rocscience Inc., en diferentes perfiles topográficos obtenidos de levantamiento en terreno y mediante uso de SIG, con topografía del área. La evaluación del peligro de flujos de detritos se realizó en quebradas susceptibles y quebradas menores inspeccionadas en terreno, que hayan sido afectadas por flujos subactuales o correspondientes a los eventos de marzo 2012. Esta evaluación se basa en análisis de antecedentes, inspección en terreno y criterios geomorfológicos, así como en el modelamiento hidráulico en las quebradas principales de los pueblos estudiados. La evaluación del peligro de inundación en quebradas laterales consideró los últimos eventos de Marzo del 2012 y que provienen de la actual modelación hidráulica de las quebradas afectadas. También se definió un peligro potencial de inundación en valle correspondiente a la zona inundable aguas abajo de la zona de depositación de los flujos detríticos.

## 4. RESULTADOS

Del estudio efectuado, se obtuvieron los resultados a nivel general que se indican a continuación.

### 4.1 Evaluación geológica

A partir de la evaluación geológica se obtuvieron los mapas geológicos que se presentan a continuación para las localidades estudiadas.

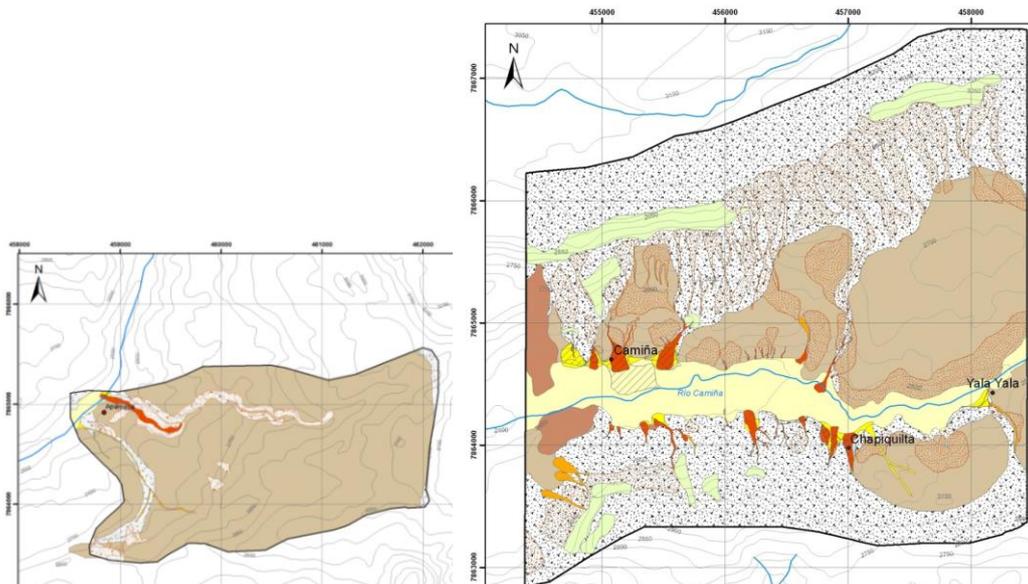


Figura 4.1. Mapa Geológico Apamilca y mapa Yala Yala Chapiquilta y Camiña

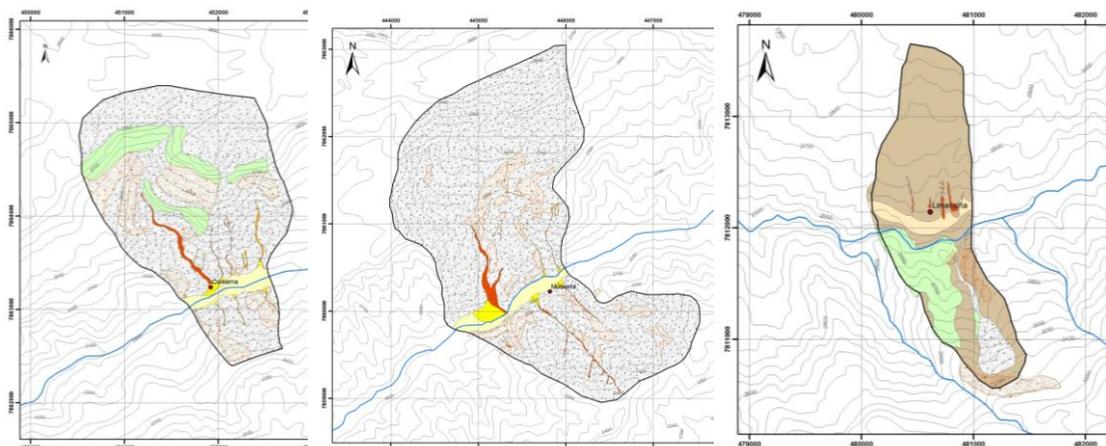


Figura 4.2. Mapas geológicos de Cuisama Moquella y Limacsiña

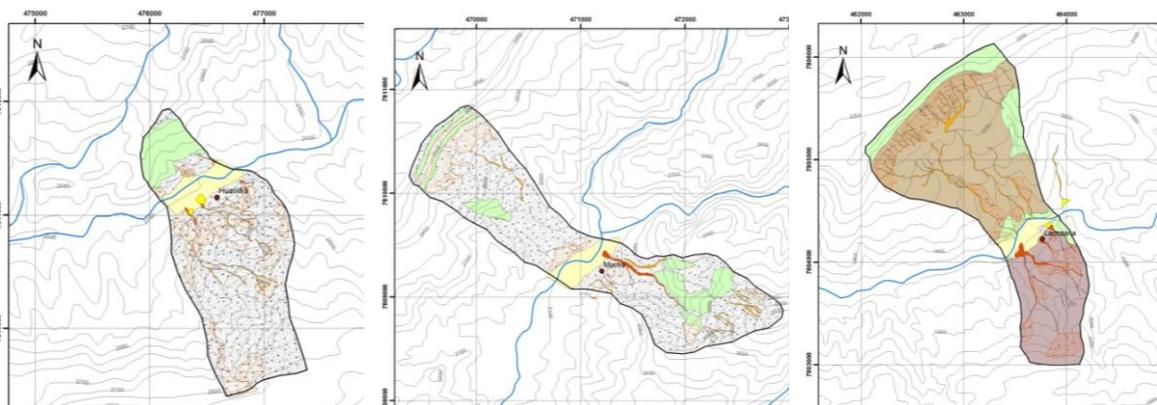


Figura 4.3. Mapas geológicos de Huaviña, Mocha y Laonzana

**DIAGNÓSTICO DE RIESGO EN QUEBRADAS LATERALES A LOS CAUCES DE QUEBRADAS DE CAMIÑA Y TARAPACA**



### 4.2 Evaluación hidrológica e hidráulica

A partir de los modelos hidráulicos desarrollados en el estudio se obtuvieron los mapas de planicie de inundación que se presentan a continuación para las localidades estudiadas.

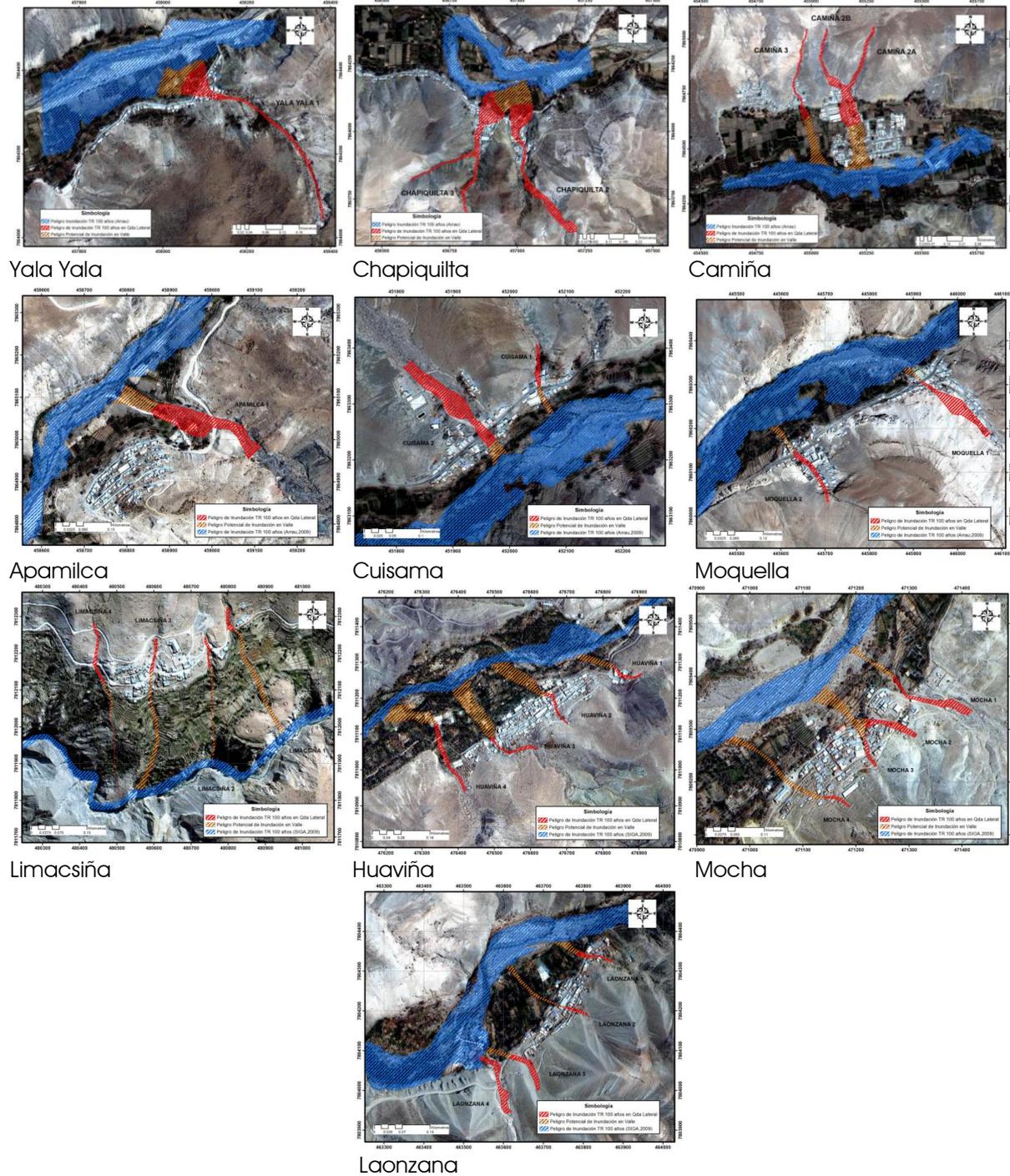
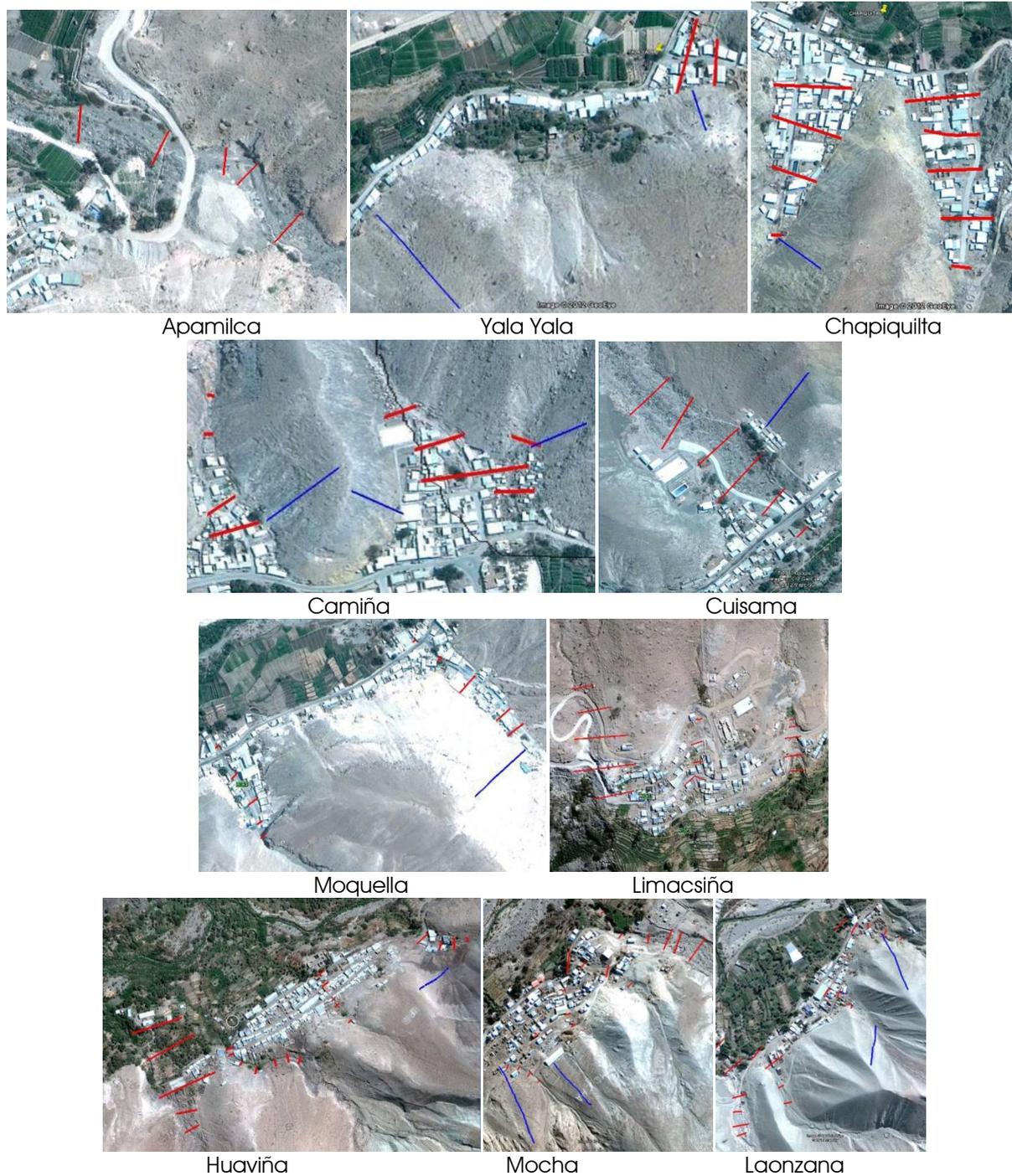


Figura 4.4. Mapas de planicie de inundación



### 4.3 Topografía

A continuación se presentan la ubicación de los perfiles transversales y longitudinales medidos conforme a los requerimientos de los especialistas geológicos e hidráulicos.



**Figura 4.5.** Ubicación de perfiles topográficos



#### 4.4 Evaluación geotécnica

A continuación se presentan la ubicación de las prospecciones geotécnicas (S: Sondajes, C: Calicata) conforme a los requerimientos de los especialistas geológicos e hidráulicos.



Figura 4.6. Layout de prospecciones Etapa 1, quebrada de Camiña



Figura 4.7. Layout de prospecciones Etapa 2, quebrada de Camiña

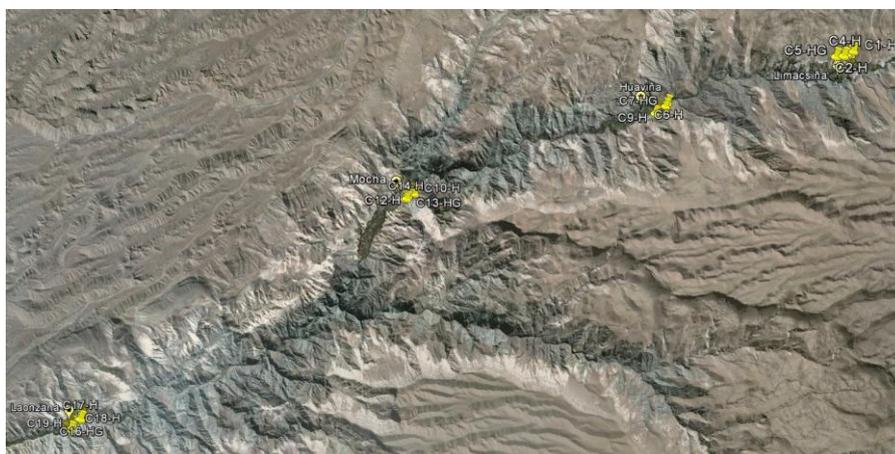


Figura 4.8. Layout de prospecciones Etapa 2, quebrada de Tarapacá

DIAGNÓSTICO DE RIESGO EN QUEBRADAS LATERALES A LOS CAUCES DE QUEBRADAS DE CAMIÑA Y TARAPACÁ



#### 4.5 Evaluación de estructuras

Conforme a los índices de vulnerabilidad estructural relativa para cada localidad, se obtuvieron los mapas de vulnerabilidad que se presentan a continuación. La vulnerabilidad estructural relativa se identifica para cada vivienda de la siguiente manera: Rojo: Alta, Amarillo: Medio y Verde: Bajo.

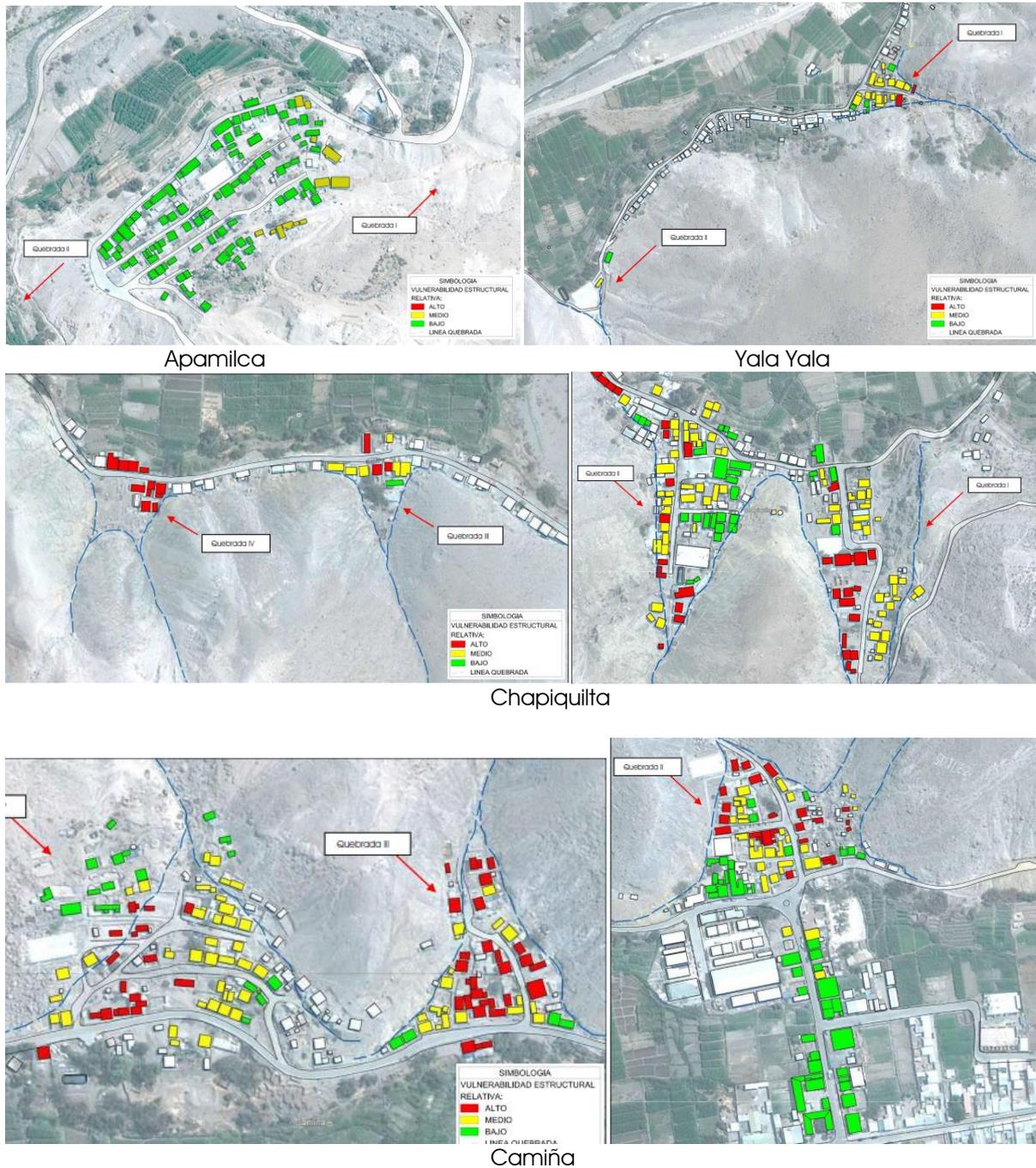
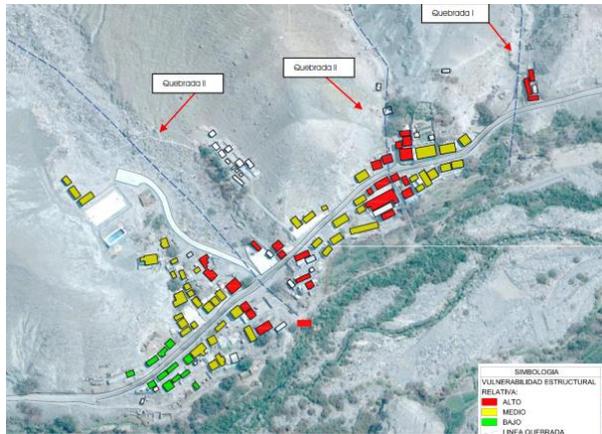
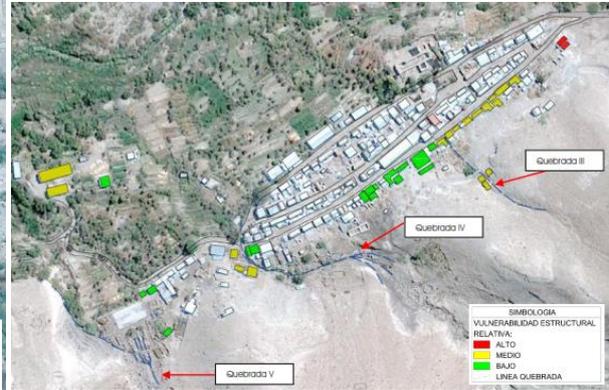


Figura 4.9. Mapas de vulnerabilidad estructural relativa

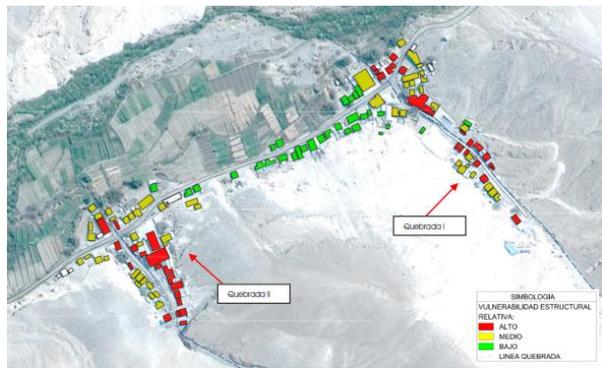
DIAGNÓSTICO DE RIESGO EN QUEBRADAS LATERALES A LOS CAUCES DE QUEBRADAS DE CAMIÑA Y TARAPACÁ



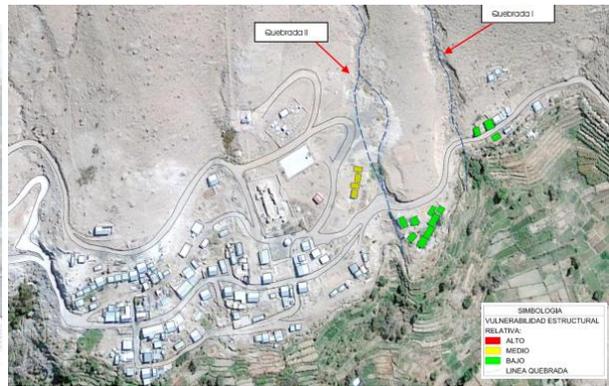
Cuisama



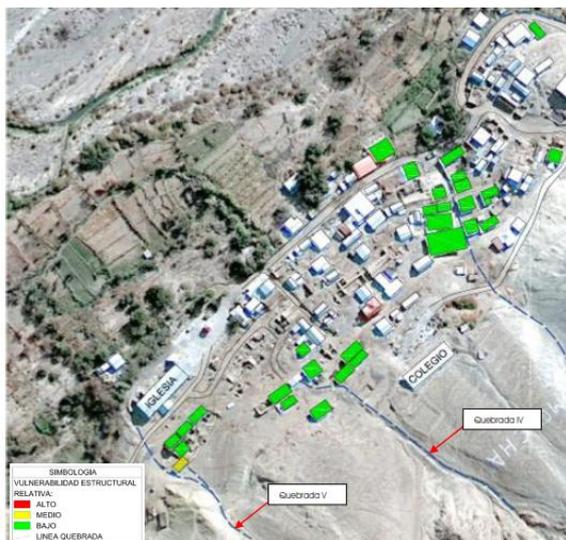
Huaviña



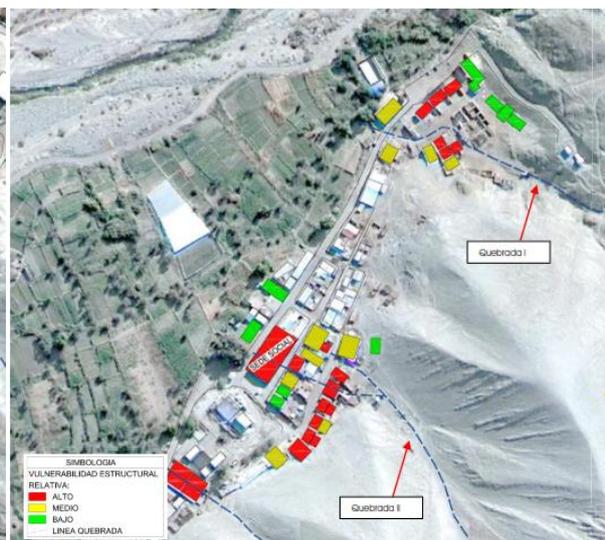
Moquella



Limacsiña



Mocha



Laonzana

Figura 4.9. Mapas de vulnerabilidad estructural relativa (continuación)

DIAGNÓSTICO DE RIESGO EN QUEBRADAS LATERALES A LOS CAUCES DE QUEBRADAS DE CAMIÑA Y TARAPACÁ



#### 4.6 Medidas estructurales de control y/o mitigación

De acuerdo a los resultados hidráulicos, geotécnicos y estructurales, junto con lo inspeccionado en terreno, se optó por las obras de mitigación tipo, de acuerdo a las condiciones en cada quebrada, tal como se muestra a continuación:

Presa Abierta. La presa abierta será realizada en el sector alto de la quebrada, con el fin de retener la mayor cantidad de material aluvional (rocas de mayor tamaño) los que serán capturados y retenidos, funcionando como un dissipador de energía y disminuyendo la probabilidad de desastres aguas abajo.

Canalización. Para los casos que haya un bajo caudal de material o el flujo ya se encuentre "filtrado", se encauzará mediante canales que se conecten con las calles principales de las quebradas. En los casos que se propone canalizar a través de las vías de acceso esto involucra modificar el trazado de la vía siguiendo la dirección natural del cauce.

Piscinas (estructuras de control de flujos). Esta solución permite almacenar gran parte de los sólidos arrastrados con el aluvión, con el fin de que la concentración volumétrica que se descargue aguas abajo sea la mínima posible, además permite proteger el camino minimizando la posibilidad de aislamiento producto de colapso de la obra vial.

Zanja y muro de contención de material para deslizamiento de rocas. Con el fin de proteger las viviendas ante los deslizamientos de rocas, se considera una zanja en el perímetro de las casas contiguas al riesgo, además se considera para mayor seguridad construir un muro el cual contenga impactos de rocas.

Malla de contención (presa permeable). En los casos que el tamaño del sedimento sea menor que en los que amerite la presa abierta, se considera instalar un muro con mallas enrejadas en dirección perpendicular al flujo. Para este caso, el propósito principal es ser un dissipador de energía del flujo, y transformarse en una presa contenedora del material.

#### 4.1 Mapas de peligro

A continuación se presentan los mapas de peligro y de peligro modificado (con obras de mitigación) para cada pueblo según el tipo de peligro. En casos que no hay obras de mitigación, por no identificarse peligros altos en las zonas pobladas, el mapa es el mismo.

Al considerar la ejecución y adecuada mantención de las obras estructurales de mitigación propuestas en el presente estudio, es posible modificar los mapas de peligro. Las obras están centradas en zonas identificadas con peligro de grado Alto en la evaluación de peligros. El criterio utilizado en los mapas modificados es la disminución de la peligrosidad en un grado en las zonas protegidas por obras de mitigación, como muros, zanjas, canalizaciones, presas, mallas y hondonadas. Así, se eliminan zonas de peligro Alto en las áreas pobladas, graduándose la peligrosidad entre peligro Medio, Bajo y Muy Bajo en estos sectores.

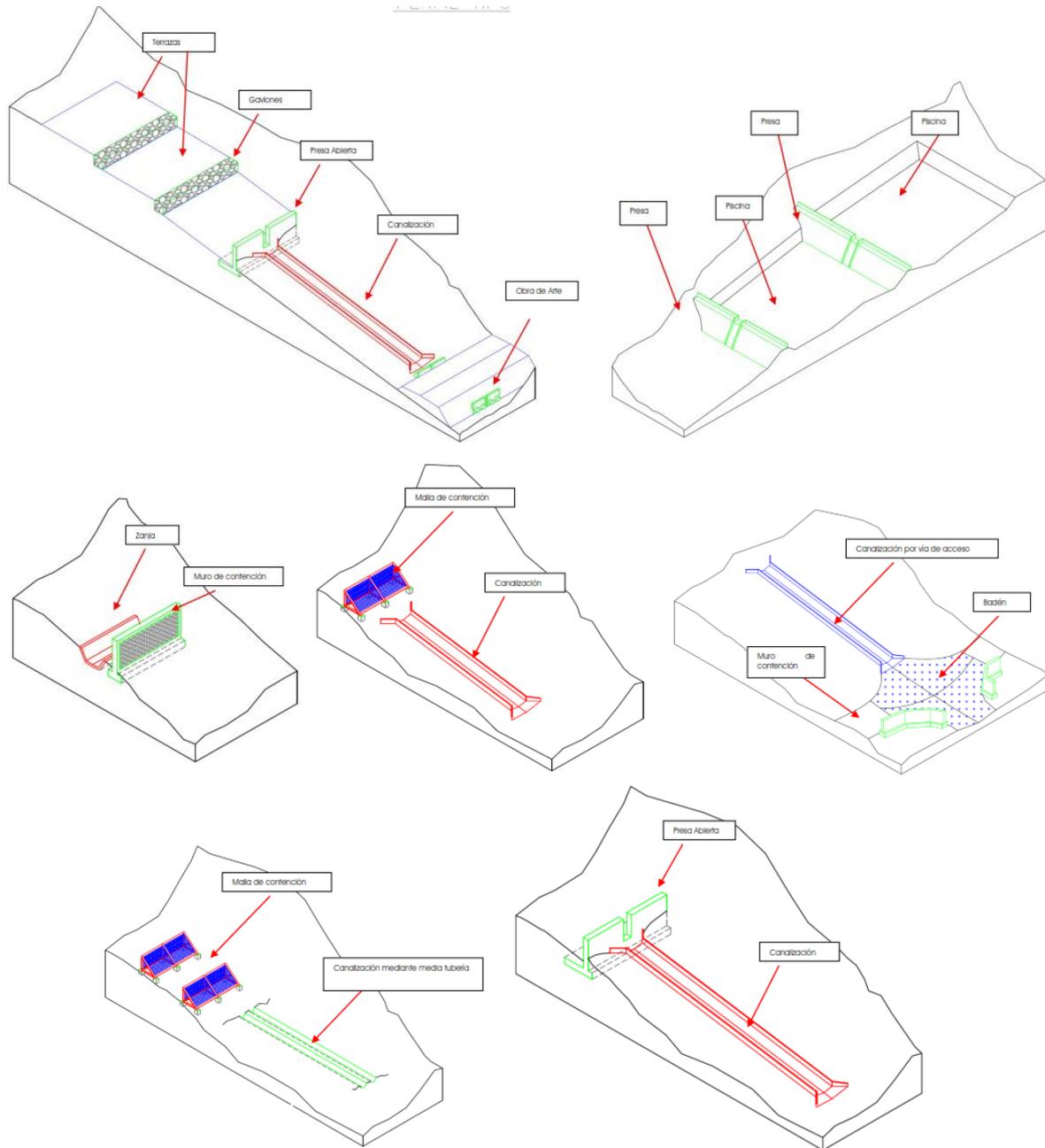


Figura 4.10. Obras de mitigación propuestas

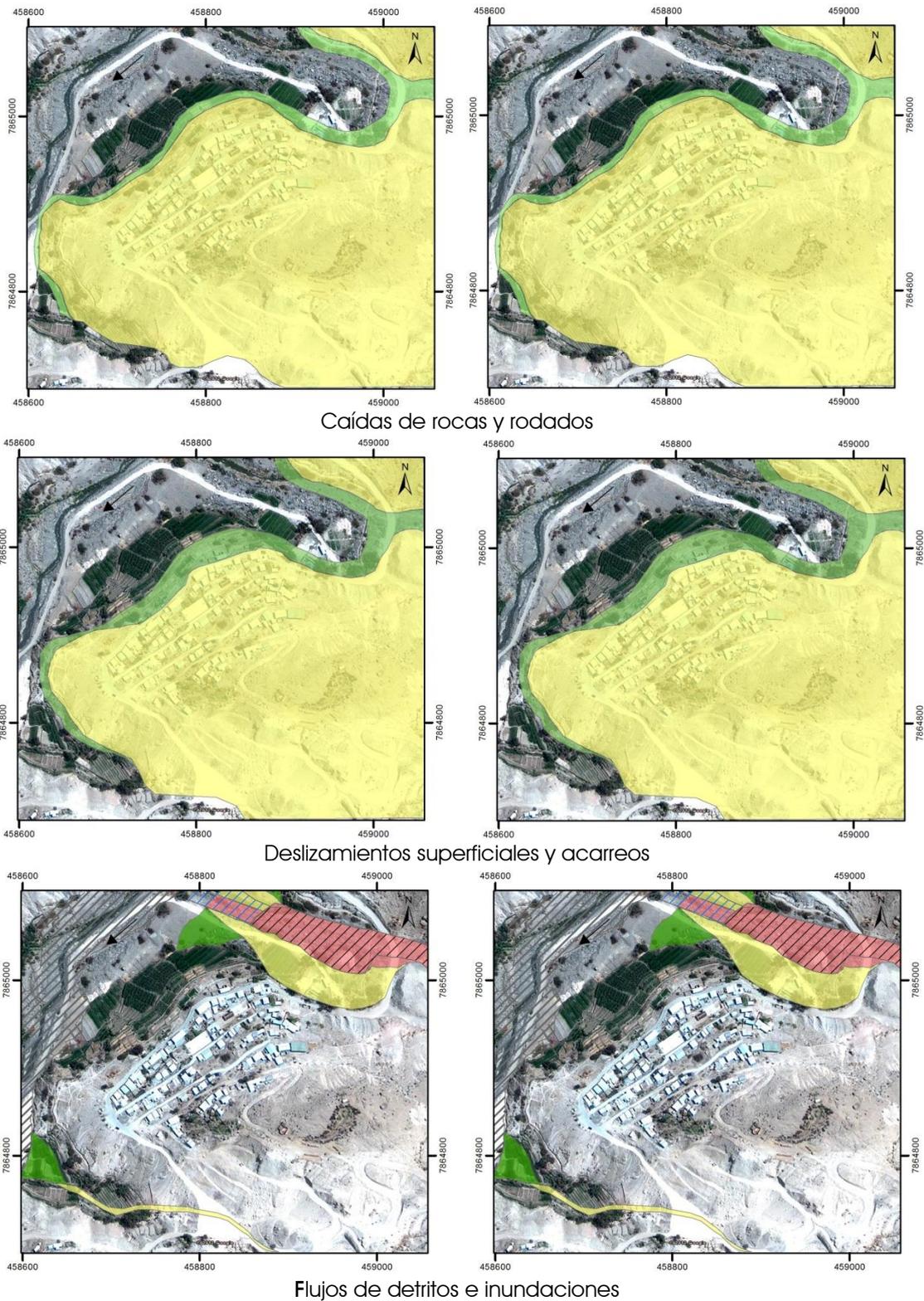


Figura 4.11. Mapas de peligro (izquierda) y Mapas de peligro modificado (derecha) Apamilca

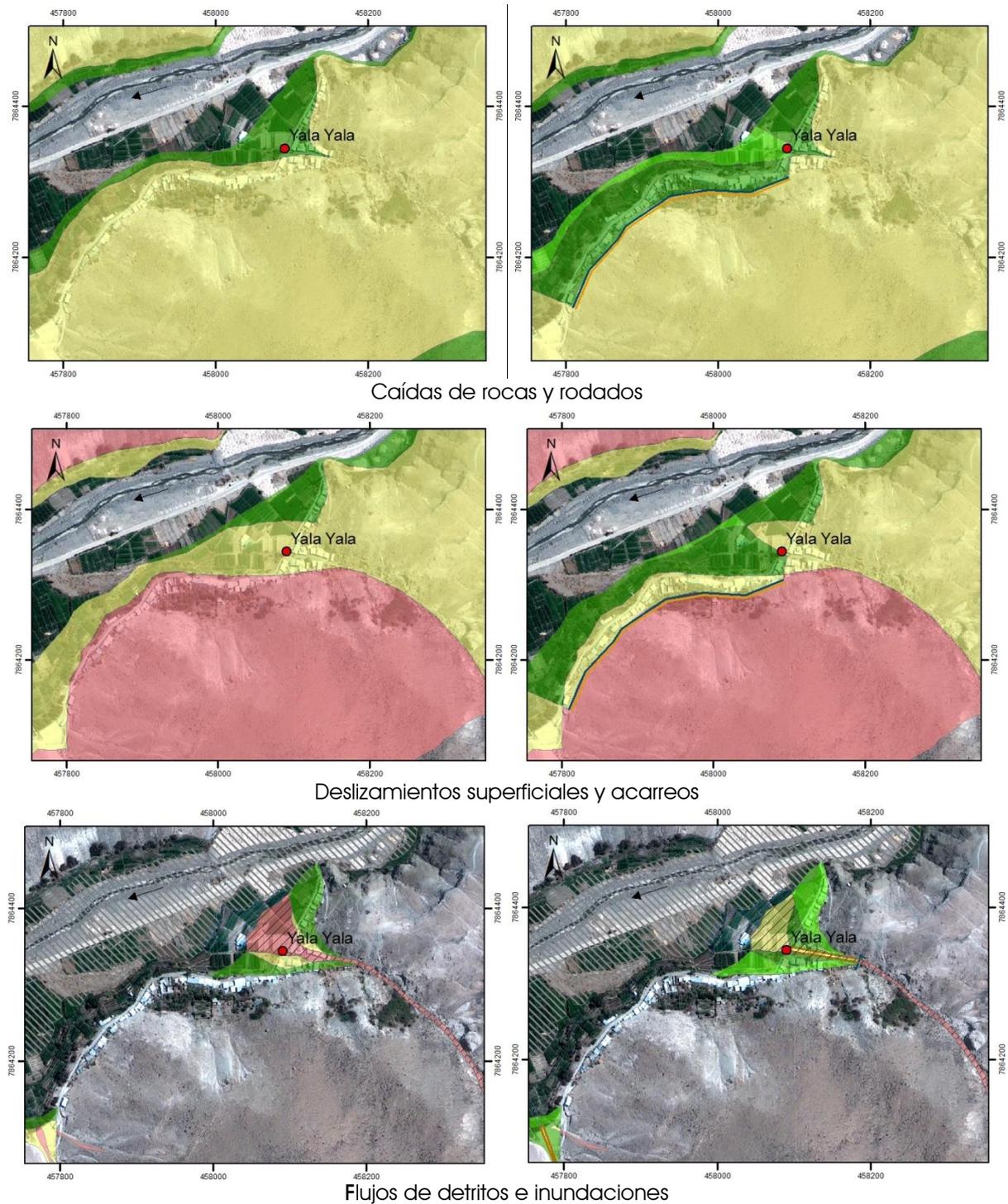


Figura 4.12. Mapas de peligro (izquierda) y Mapas de peligro modificado (derecha) Yala Yala

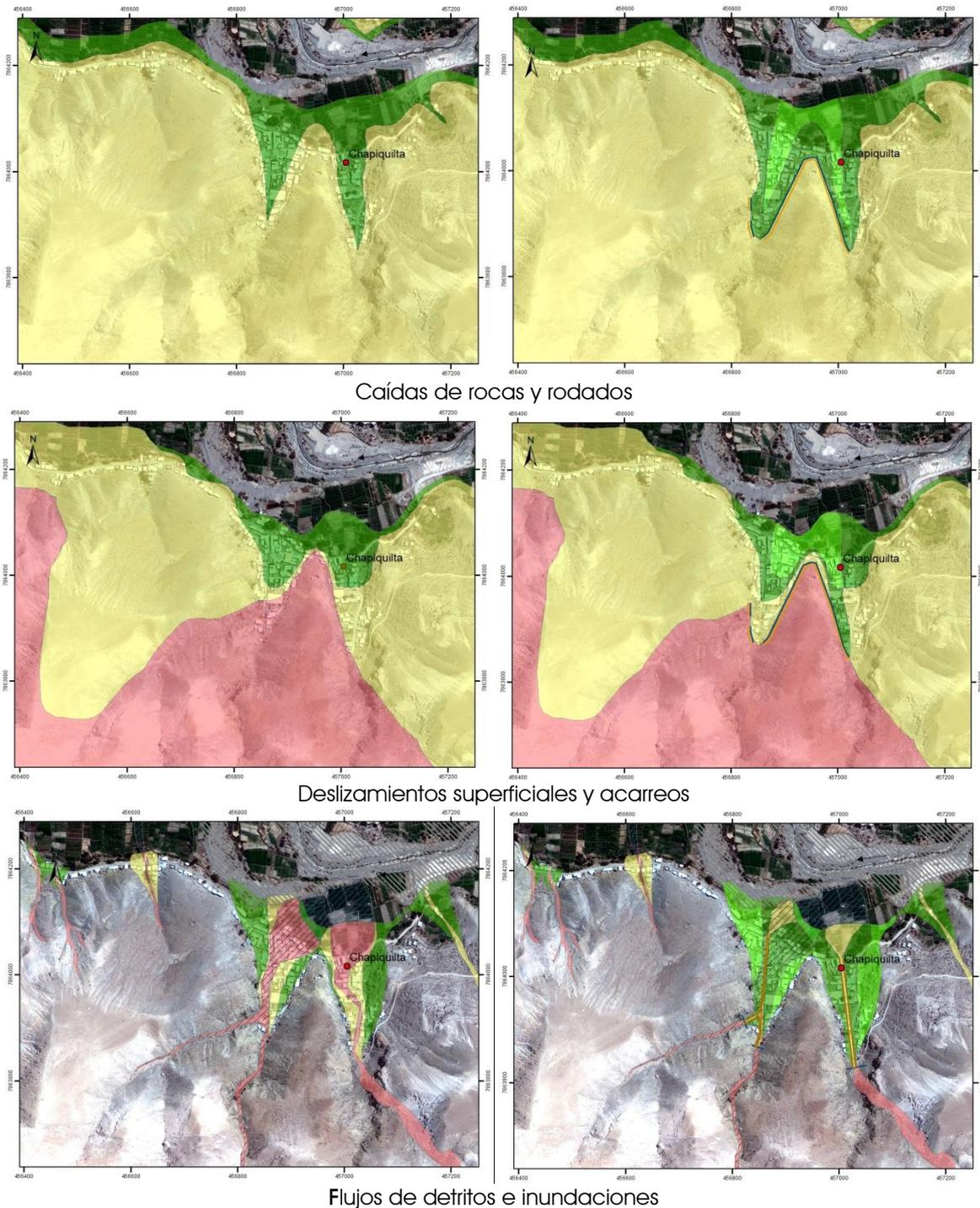
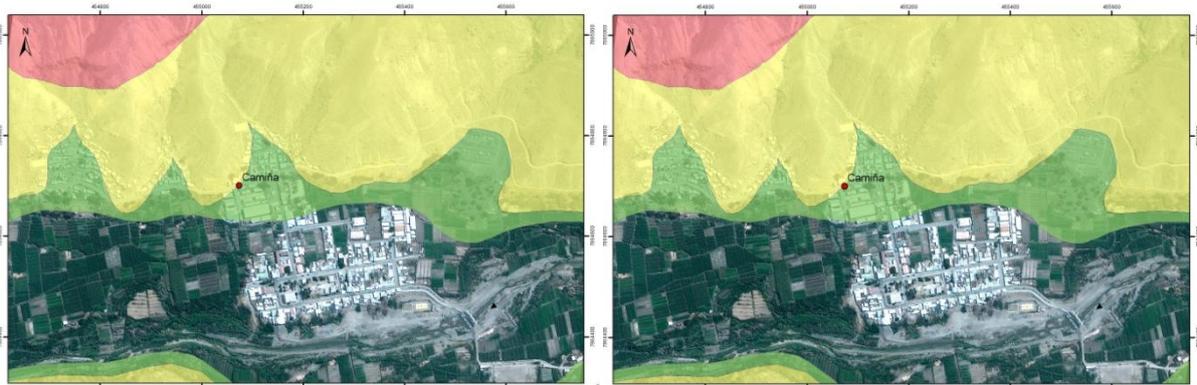
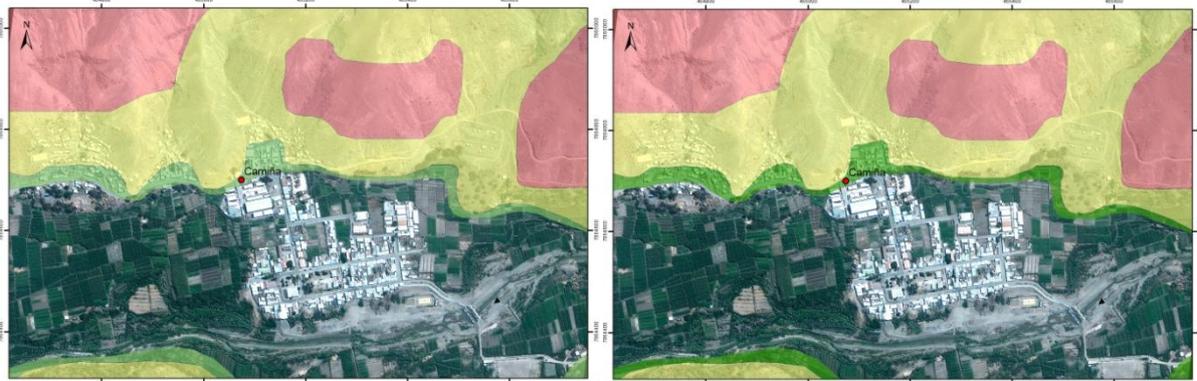


Figura 4.13. Mapas de peligro (izquierda) y Mapas de peligro modificado (derecha) Chapiquilla.



Caídas de rocas y rodados



Deslizamientos superficiales y acarrees



Flujos de detritos e inundaciones

Figura 4.14. Mapas de peligro (izquierda) y Mapas de peligro modificado (derecha) Camiña.

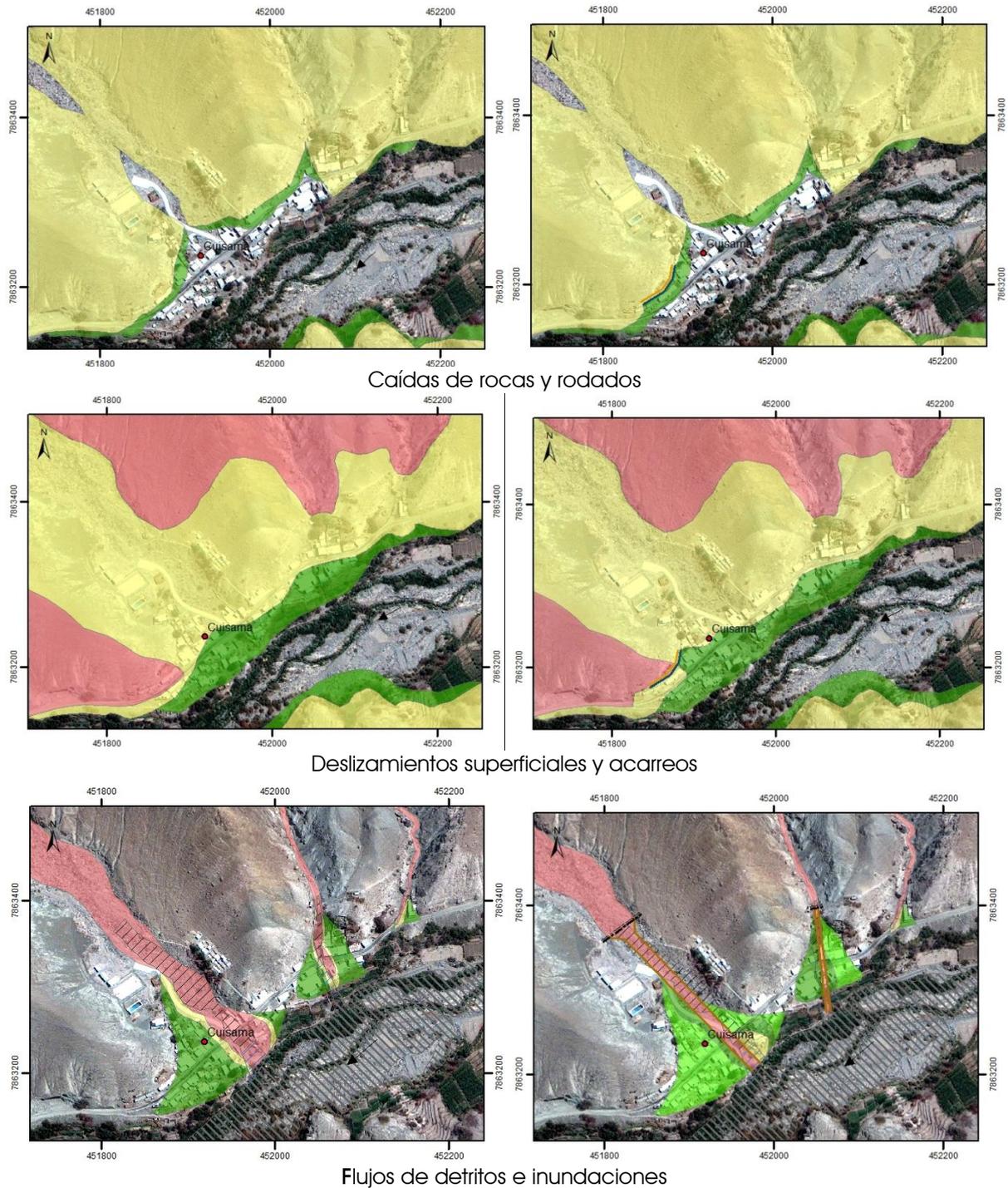


Figura 4.15. Mapas de peligro (izquierda) y Mapas de peligro modificado (derecha) Cuisama.

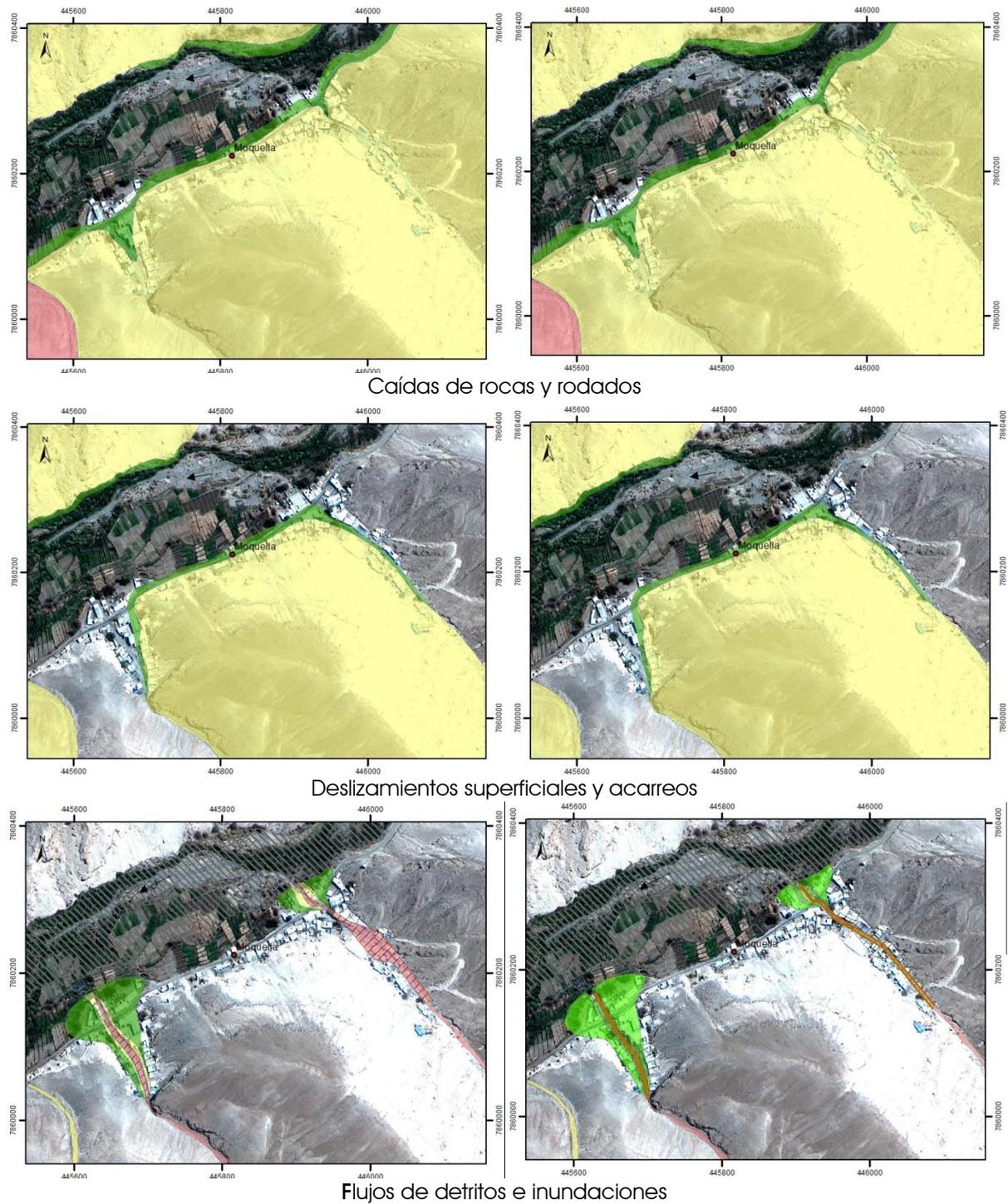


Figura 4.16. Mapas de peligro (izquierda) y Mapas de peligro modificado (derecha) Moquella.

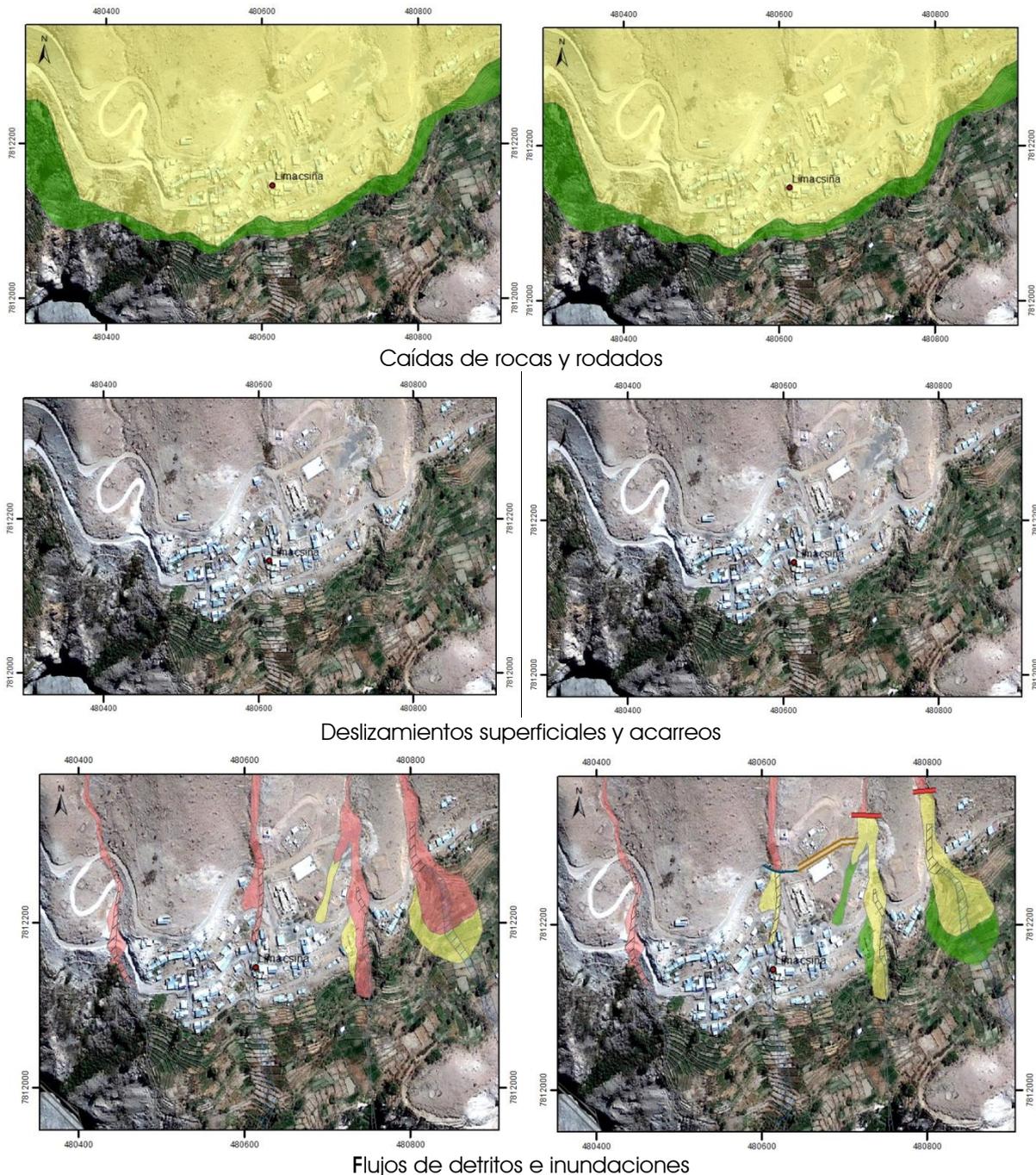


Figura 4.17. Mapas de peligro (izquierda) y Mapas de peligro modificado (derecha) Limacsíña.

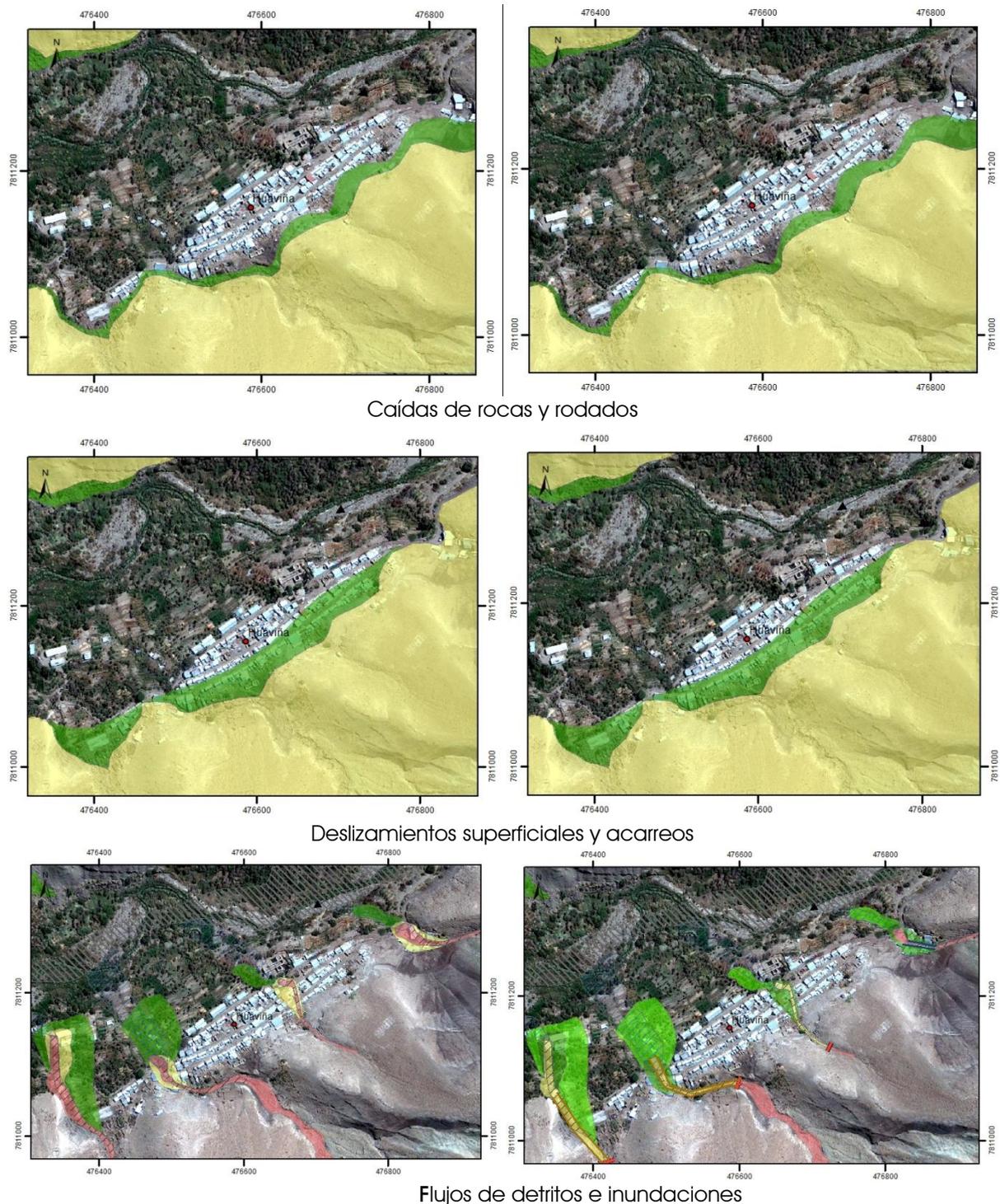


Figura 4.18. Mapas de peligro (izquierda) y Mapas de peligro modificado (derecha) Huaviña.

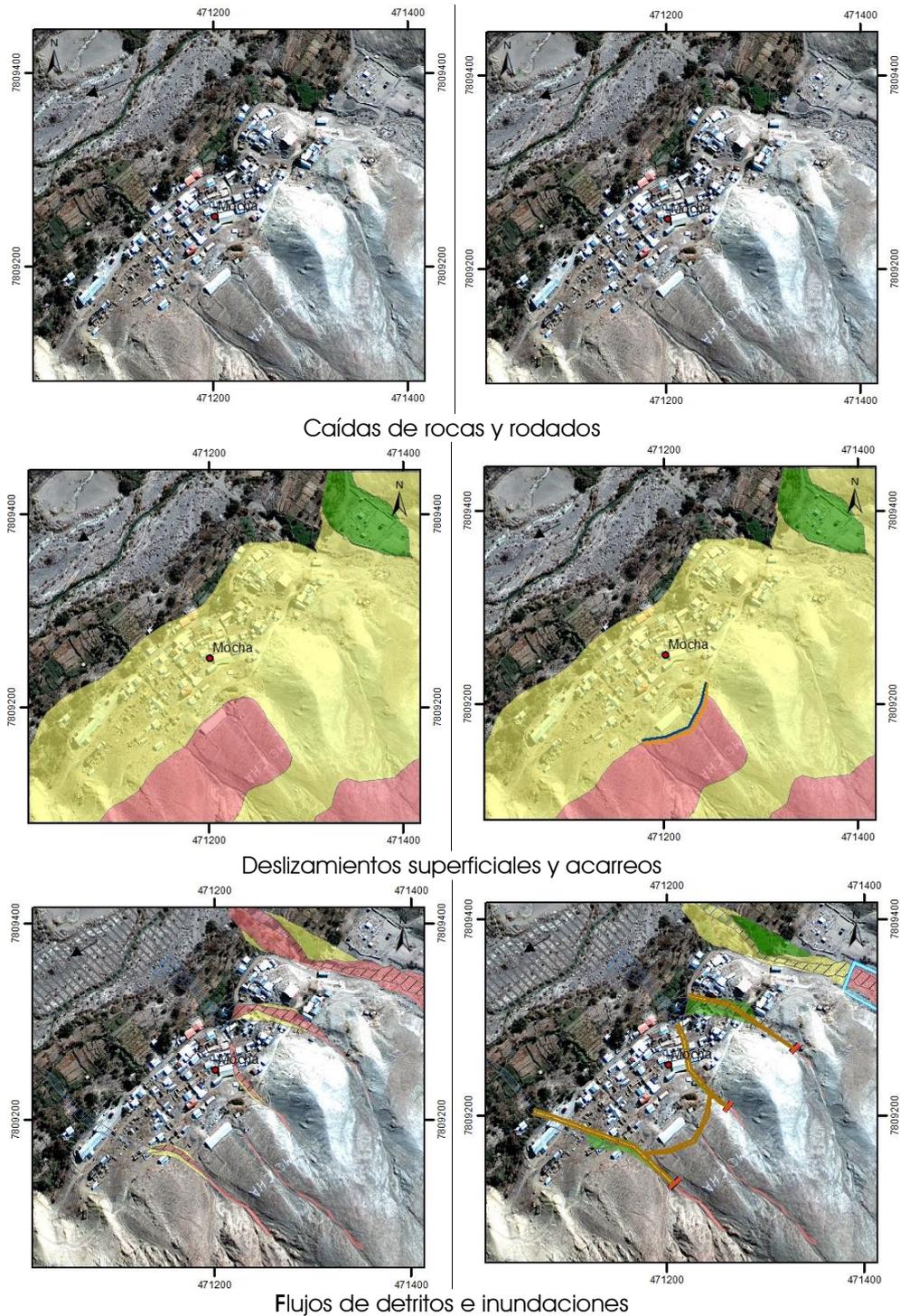


Figura 4.19. Mapas de peligro (izquierda) y Mapas de peligro modificado (derecha) Mocha.

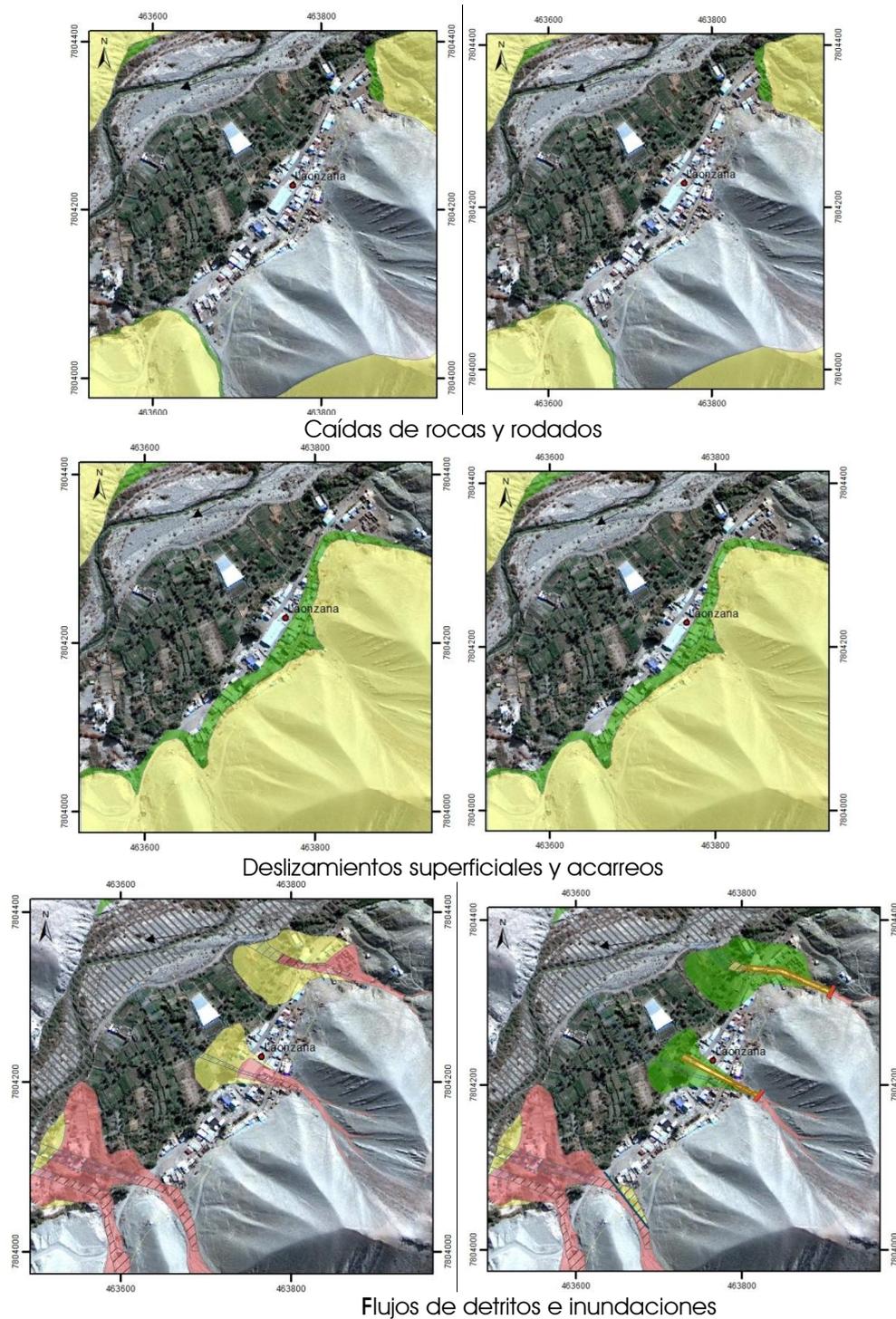


Figura 4.20. Mapas de peligro (izquierda) y Mapas de peligro modificado (derecha) Laonzana.



## 5. CONCLUSIONES

De acuerdo al estudio realizado se establecen las conclusiones que se indican a continuación.

### 5.1 Geología

Las quebradas de Camiña y Tarapacá se ubican al noreste de Iquique, siendo la quebrada de Camiña la más septentrional. A la latitud del estudio se diferencian, de oeste a este, la Cordillera de la Costa, la Depresión Central, la Precordillera, la Cordillera Occidental y el Altiplano. Las localidades de Apamilca y Cuisama, en la quebrada Camiña se ubican en la Precordillera, al este de la denominada Flexura Moquella. Moquella se ubica aproximadamente sobre la flexura homónima. En la quebrada de Tarapacá, las localidades de Laonzana, Mocha y Huaviña se ubican en la Depresión Central y Limacsiña en el límite entre la Depresión Central y la Precordillera.

En la quebrada Tarapacá, la carta geológica de Chile 1:1.000.000 (Sernageomin, 2003) y observaciones de terreno permiten señalar que Limacsiña se ubica sobre depósitos de un megadeslizamiento, Huaviña y Laonzana en rocas volcánicas cretácicas asignadas a la Formación Cerro Empexa y Mocha sobre rocas intrusivas cretácicas.

La localidad de Apamilca, al este del poblado de Camiña, se ubica sobre depósitos de un megadeslizamiento; Cuisama sobre rocas de la Formación Cerro Empexa y Moquella en rocas asignadas a la Formación Latagualla.

En el área de estudio se observó que las laderas son en general empinadas y en varias zonas existen bloques mayores inestables. Las quebradas por su parte, son de no mucha longitud, y en general, tienen pendientes bastante empinadas. En la mayoría de las quebradas existe en su cauce gran cantidad de bloques métricos.

En las localidades estudiadas de las quebradas de Camiña y Tarapacá, se distingue un sustrato rocoso, cubierto por un manto coluvial, depósitos de remoción en masa antiguos, depósitos de abanicos aluviales y depósitos aluviales.

El basamento rocoso, en general correspondiente a rocas de las formaciones Cerro Empexa y Latagualla, está cubierto por un manto coluvial de poco espesor, constituido por distintos materiales, desde grava angulosa a bloques métricos, dominando el tamaño grava gruesa. En este material se ha observado el desarrollo de cárcavas asociadas a la última lluvia de marzo de 2012.

Los depósitos de remoción en masa antiguos se asocian a antiguos deslizamientos profundos de roca, de gran dimensión, los cuales se consideran inactivos a la escala del estudio. Estos deslizamientos, que se ubican en ambas laderas de las quebradas de Camiña y Tarapacá, están constituidos por bloques de rocas perturbados en distinto grado.

Los depósitos aluviales incluyen los depósitos actuales de los cauces de las quebradas Camiña y Tarapacá y los depósitos que conforman las terrazas donde se ubica la mayoría de los poblados y la actividad agrícola.

Los depósitos de abanicos aluviales, constituidos por gravas y bloques en una matriz arenosa están ubicados en las quebradas de las laderas norte y sur de las quebradas de Camiña y Tarapacá.



Los flujos de detritos corresponden a material detrítico depositado en quebradas menores como flujos de detritos durante eventos anteriores a 2012. En este estudio se diferenciaron los flujos de detritos generados en 2012.

## 5.2 Hidrología e Hidráulica

La respuesta hidráulica de la corriente de detrito será diferente según sea el abanico aluvial, el patrón de alineamiento, la pendiente del cauce principal y de las laderas, además de la matriz del suelo que conforman el cauce y del grado de interferencia del cauce producto de obras civiles.

En las quebradas sin alteración por estructuras u obras civiles, los flujos son más bien abiertos con varios brazos que están en continua modificación. Para el análisis hidráulico, las quebradas sin grado de alteración antrópica no fueron incluidas y el mapa de peligros por inundación corresponde a la unificación de criterios geológicos e hidráulicos para definir los brazos del cauce principal y los límites de la planicie de inundación.

En las quebradas con alteración antrópica, principalmente por viviendas y obras civiles, los flujos se desarrollaron principalmente a través del eje de la quebrada, que en algunos casos corresponde a la calle o vía de acceso principal. En las quebradas que poseen un grado de interferencia importante del eje natural, el flujo de detritos generó la destrucción parcial o total de las obras.

## 5.3 Evaluación de estructuras

Los resultados de la evaluación de estructuras se resumen a continuación:

- En Apamilca, el emplazamiento de esta localidad es en la ladera de cerro, de lo cual se obtuvo una predominancia de valores bajos de vulnerabilidad.
- En Yala Yala, se observan predominancia a valores medios de vulnerabilidad.
- En Chapiquilta en los sectores altos de las quebradas presenta valores altos de vulnerabilidad.
- Camiña presenta los valores de vulnerabilidad en los sectores altos de las quebradas.
- En Cuisama el valor alto de vulnerabilidad se debe a exposición directa al flujo.
- En Moquella la tendencia de vulnerabilidad alta se observa en el sector alto de las quebradas.
- En Limacsiña las quebradas poseen baja pendiente y no se detectaron viviendas que fueran afectadas severamente.
- En Huaviña las viviendas con vulnerabilidad alta se encuentran directamente expuestas al flujo.
- En Mocha el flujo es paralelo a los caminos existentes en la mayor parte de las quebradas, lo que implica que las viviendas observadas no fuesen directamente expuestas al material aluvional.
- En Laonzana, la disposición de las viviendas en las quebradas genera valores de vulnerabilidad altos.

## 5.4 Mapas de Peligro

La evaluación de peligro de remoción en masa se orientó específicamente a los fenómenos catalogados como deslizamientos superficiales y acarrees, flujos de detritos, y caídas de rocas y rodados.

Para el análisis de susceptibilidad de remoción en masa, la zona de estudio se dividió en unidades diferenciadas en base a su geología y geomorfología, y mediante la implementación de SIG, se



evaluó para cada una de estas unidades el grado de susceptibilidad de cada tipo de remoción en masa.

En las zonas más susceptibles aledañas a los poblados se realizó una evaluación de peligro, considerando criterios de pendiente, estabilidad de taludes según condiciones geotécnicas de las laderas, información geomorfológica de eventos de remoción en masa recientes y pasados e incorporando resultados de los modelos hidrológicos para el caso de los flujos de detritos. Para cada tipo de peligro, se definieron grados de peligro Alto, Medio Bajo.

El emplazamiento de Apamilca en el borde de un gran deslizamiento profundo, con material no consolidado en sus laderas genera peligro Alto de deslizamientos superficiales y acarrees y de rodados de bloques en la zona del pueblo. El mayor peligro corresponde al de flujos de detritos en la quebrada ubicada al nororiente del pueblo, con grado Alto.

En el poblado de Yala Yala se observa peligro de deslizamientos superficiales y rodados que pueden afectar las viviendas al pie de las laderas, con peligros que alcanzan grados Alto y Medio, respectivamente. Para el caso de los flujos de detritos, estos afectan los dos abanicos ubicados a ambos extremos del pueblo, los cuales presentaron flujos durante el evento de marzo de 2012. El abanico oriental es el de más relevancia, afectando con peligro Alto gran parte de la zona habitada.

En Chapiquilita se observan laderas con peligro de deslizamientos superficiales de grados Alto a Medio, y Medio de caídas de rocas, afectando con grado Medio la mayor parte de las zonas habitadas. Las zonas de peligro Alto y Medio de flujos de detritos abarcan la mayor parte de la zona del poblado localizada en los dos abanicos aluviales principales. También se reconoce peligro importante en las salidas de quebradas menores ubicadas al oeste y al este de los abanicos principales, afectando el camino y casas ubicadas en el cauce.

En la localidad de Camiña, las zonas de peligro Alto de deslizamientos superficiales se ubican hacia las partes altas de las laderas que rodean el pueblo, sin afectar directamente las zonas pobladas. También afectan el camino de tierra que corre al pie de la ladera norte. Se observa peligro Medio en las laderas y hasta las partes medias de los abanicos aluviales poblados, bajando a peligro Bajo hacia el interior de los abanicos. Similar distribución muestra el peligro de caídas y rodados. El peligro de flujos de detritos afecta los cuatro abanicos aluviales del pueblo. Los tres más orientales muestran peligros de grado Medio y Alto, con grado Bajo hacia los bordes. El abanico más occidental presenta peligro de grado Bajo en su mayor parte, con grados Medio y Alto en zonas restringidas al encauzamiento de flujos de las quebradas que alimentan este abanico.

El mayor peligro en Cuisama corresponde al de flujos detríticos en la quebrada mayor que atraviesa el pueblo y en quebradas secundarias, con grado Alto. Este nivel se alcanza también para deslizamientos superficiales en el sector poniente. El resto del pueblo se encuentra bajo niveles Medio y Bajo para los distintos peligros considerados.

En Moquilla domina el peligro en nivel Medio en las laderas que rodean la zona habitada por caídas de rocas, rodados y deslizamientos o acarrees superficiales. En tanto las quebradas que drenan hacia el pueblo presentan peligro Alto, con zonas de peligro Bajo en los abanicos aluviales respectivos.

El material y pendientes de Limacsiña generan una situación de baja susceptibilidad y por tanto sin peligro de deslizamientos y acarrees superficiales. Las caídas de rocas presentan peligro alto, en



este caso asociado a rodados de bloque aislados, mientras que el peligro de flujos de detritos es Alto a Medio en cuatro quebradas que pasan por el pueblo, con zonas de potencial inundación asociada a flujos en los niveles de terrazas ubicados bajo la zona poblada.

En Huaviña se identifica peligro Alto en la zona urbana graduando hacia Medio en las zonas de laderas detrás del pueblo para deslizamientos superficiales y caídas y rodados de roca. El mayor peligro corresponde a flujos detríticos en las cuatro quebradas que drenan en la zona del pueblo, con niveles que varían entre Alto y Bajo.

Para el pueblo de Mocha se identifica peligro Alto en el sector más alto del pueblo, donde se ubica la escuela. Por la granulometría de los depósitos, no se identifica peligro de caídas o rodados de bloques mayores. En tanto, el peligro de flujos detríticos es Medio en las quebradas, destacando la quebrada mayor del sector nororiental, la cual afecta el camino de acceso al pueblo.

En Laonzana los deslizamientos superficiales alcanzan grado de peligro Bajo en la mayor parte del pueblo, mientras que las caídas de rocas y rodados se restringen a los extremos del pueblo. El peligro más importante es nuevamente el de flujos detríticos, que afectan una parte significativa del pueblo por cuatro quebradas de distinto tamaño que drenan a través de él, afectando también las terrazas ubicadas inmediatamente bajo la zona urbana.

El peligro identificado de mayor importancia es el de flujos de detritos, que implica la propuesta de obras de mitigación para todos los poblados con la excepción de Apamilca.

### 5.5 Obras de Mitigación

Las obras de mitigación se han seleccionado y ubicado conforme a los siguientes criterios:

- Reducción del tamaño de partículas.
- Reducción de la energía del flujo.
- Encauzamiento del flujo.
- Protección frente a deslizamientos superficiales.

Cabe destacar que estas obras de mitigación son sólo conceptuales, y para realizarse se debe realizar el cálculo respectivo, y adecuarse a las restricciones geométricas de cada quebrada.

### 5.6 Mapas de peligro modificados

La ejecución y adecuada mantención de las obras estructurales de mitigación descritas en este estudio, centradas en zonas identificadas con peligro de grado Alto, permiten modificar los mapas de peligro obtenidos. El criterio utilizado en los mapas modificados es la disminución de la peligrosidad en un grado en las zonas protegidas por obras de mitigación, como muros, zanjas, canalizaciones, presas, mallas y hondonadas. Así, se eliminan zonas de peligro Alto en las áreas pobladas, graduándose la peligrosidad entre peligro Medio, Bajo y Muy Bajo en estos sectores.

Se debe tener presente que los mapas de peligro modificados se han definido a partir de obras de mitigación propuestas a nivel conceptual, por lo que la zonificación final del peligro quedará sujeta a la ingeniería de detalle de las obras de mitigación.



### 5.7 Sectores potencialmente habitables

En relación a la habitabilidad de las zonas enmarcadas en los mapas de peligro, tanta para la situación sin obras de mitigación como para las obras con mitigación, se concluye lo siguiente:

- (a) Las zonas identificadas con peligro Alto no son habitables.
- (b) Las zonas identificadas con peligro Medio y Bajo se consideran habitables en la medida que contemplen algún plan de contingencia frente a eventos climáticos extremos.

### 6. RECOMENDACIONES

A partir del estudio efectuado se recomienda lo siguiente:

1. Cualquier sector que se contemple factible de habitar dentro del área identificada por los mapas de peligro donde actualmente no existen viviendas, debe considerar un estudio de mecánica de suelos del sector, un análisis de estabilidad de taludes y un diseño de obras de mitigación suplementarias conforme a los peligros ya identificados en el presente estudio.
2. Los proyectos de urbanización deben contemplar una planificación urbana que considere los resultados de este estudio. Asimismo, debe considerar los siguientes aspectos:
  - Diseñar vías de encauzamiento principal para la evacuación de los flujos provenientes de las quebradas laterales. Las nuevas viviendas y estructuras no deben obstaculizar el sentido natural del flujo.
  - Desarrollar un sistema de alerta temprana y zonas de seguridad para la evacuación de la población en caso eventos climáticos extremos para las zonas de peligro.
  - Restringir la densidad poblacional en las zonas con algún nivel de peligro (Alto, Medio y Bajo).
  - La materialidad de las viviendas debe ser acorde al nivel de peligro asociado, es decir en las zonas de peligro Alto y Medio deben contemplar viviendas de albañilería y hormigón armado.
  - Se deben evitar las edificaciones públicas o con aglomeración de personas en zonas catalogadas con algún nivel de peligro.