



PERÚ

Ministerio
del Ambiente



Informe técnico:

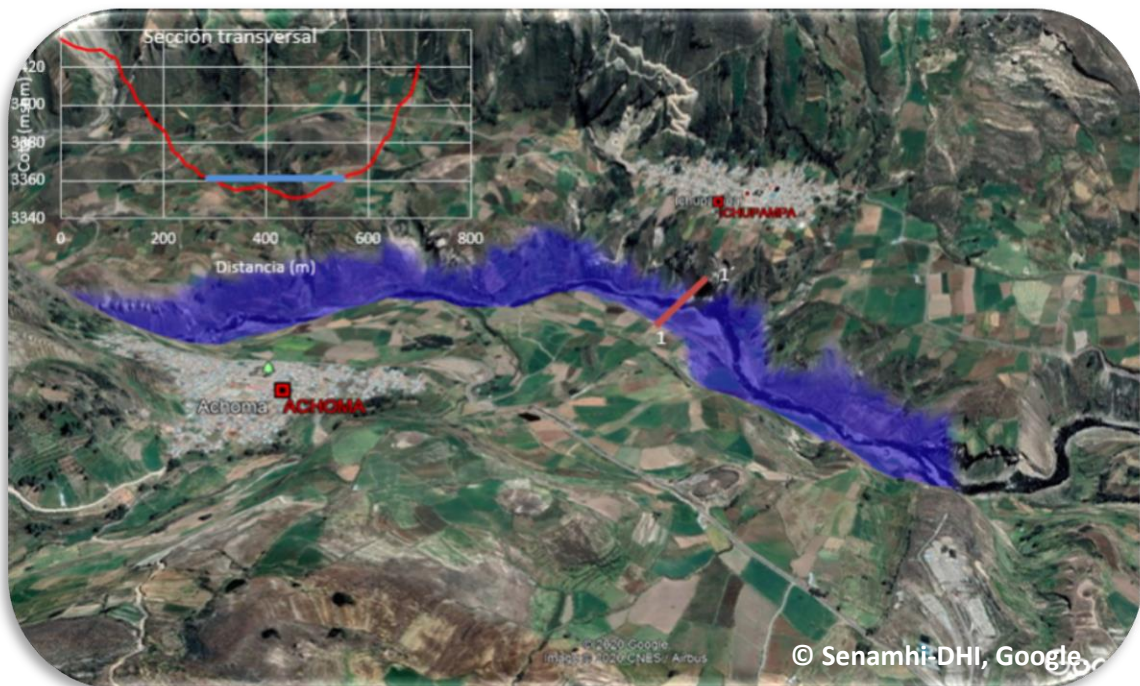
Evaluación de los escenarios de peligro hidrológico en los ríos Colca-Majes-Camaná

Elaborado por:

Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú - SENAMHI

Dirección de Hidrología / Subdirección de Predicción Hidrológica: L. Metzger, C. Pantoja, C. Martínez, D. Yaranga/Subdirección de Estudios e Investigaciones Hidrológicas: C. Millán.

Dirección Zonal 6 - Arequipa/G. Gutierrez, J. Cutipa



EL PERÚ PRIMERO

EVALUACIÓN DE LOS ESCENARIOS DE PELIGRO HIDROLÓGICO EN LOS RÍOS COLCA-MAJES- CAMANÁ

I. INTRODUCCIÓN

El día 18 de junio del presente año se produjo uno de los más grandes deslizamientos de tierra en el sur del Perú ocasionado por un sismo. Dicho deslizamiento ocasionó el embalse del río Colca en el distrito de Achoma de la provincia de Carabaya-Arequipa.

Mediante Decreto Supremo N° 111-2020-PCM se emite la declaratoria de estado de emergencia a los distritos de Achoma, Yanque e Ichupampa por desastre a consecuencia de deslizamientos de tierra.

El SENAMHI ha venido informando sobre el comportamiento hidrológico del río Majes-Camaná y los potenciales peligros asociados al embalse de Achoma aguas arriba. En el presente informe realiza una evaluación de los potenciales peligros de inundación en la parte baja de los valles Majes-Camaná asociados a los caudales extremos en estas cuencas.

II. OBJETIVO

Elaborar los escenarios de peligro hidrológico en la cuenca Majes-Camaná asociados a caudales máximos extremos.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Datos satelitales y cartográficos de la cuenca

- Imágenes de satélite ALOS-Palsar de 12.5 m de resolución.
- Imágenes del Índice Normalizado de Agua – NDWI en base a imágenes de MODIS.
- Modelo Numérico del Terreno elaborado en base vuelos drone de INGEMMET en el sitio del deslizamiento.

3.2 Datos hidrológicos

- Base de datos histórica de caudales máximos instantáneos de la estación Huatiapa
- Información de impactos de inundaciones de los últimos años en la cuenca.
- Datos de volúmenes de almacenamiento y cota del nivel de agua del embalse de Achoma.

3.3 Aspectos metodológicos

Se aplicó el análisis probabilístico de los caudales máximos de avenidas en la estación de Huatiapa y la estimación de los tirantes de agua críticos asociados a los caudales máximos con la curva de gasto.

Se realizó la modelación matemática de escenarios de caudales pico de descarga ante el peligro de falla del dique de Achoma que embalsó las aguas del río Colca. Para este modelamiento se utilizó el modelo de erosión de brechas BREACH.

Se realizó la estimación de las zonas potenciales de inundación mediante la aplicación del método HAND-manning. La metodología del HAND-manning fue desarrollada por Zheng, en el 2018 como una alternativa hidrogeomorfológica de evaluación rápida para el mapeo de inundaciones en zonas de poca información. Una descripción detallada de la metodología se puede consultar en las referencias bibliográficas 7.1 y 7.4.

IV. RESULTADOS

4.1 Vigilancia de los Peligros de Inundación en la cuenca Colca-Majes-Camaná

4.1.1 Umbrales de Peligro de Inundación en la cuenca

El SENAMHI, tiene a cargo la vigilancia hidrológica de los principales ríos del Perú y en la cuenca del río Majes-Camaná se cuenta con la estación hidrológica de Huatiapa que permite procesar y analizar la información para la emisión de los avisos hidrológicos anticipados sobre la ocurrencia de las crecidas y las potenciales áreas de inundación basados en umbrales de peligro de caudal y/o nivel de agua. Los umbrales de peligro de inundación en Huatiapa son los que se ilustra en la Figura 1 donde se puede observar que los umbrales que se maneja operacionalmente para la Alerta son 210,0 m³/s, 300,0 m³/s y 400,0 m³/s. El umbral de nivel rojo fue establecido en base a simulación hidráulica realizada por el SENAMHI en el 2019 para un tramo de río de 450 m, tal como se indica en la Figura 2.

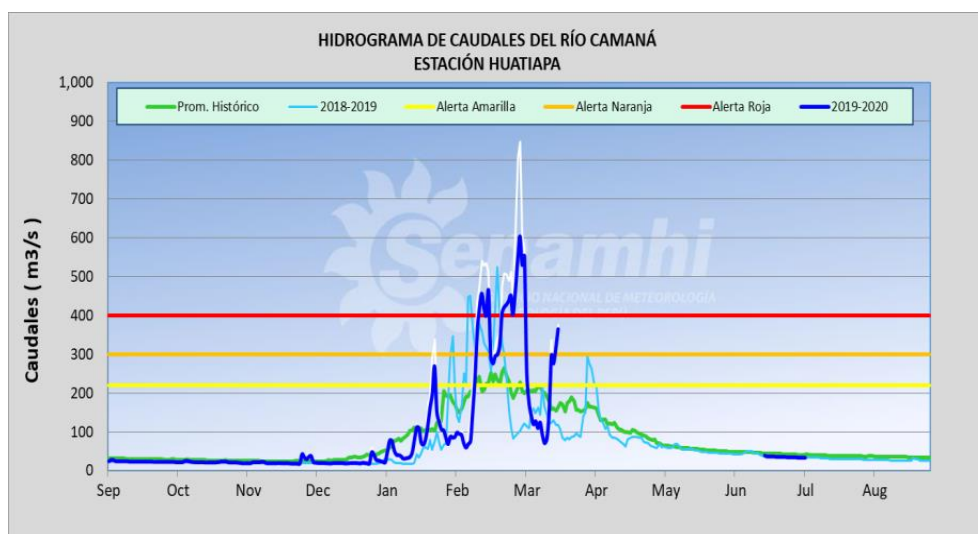


Figura 1. Hidrograma de caudal del río Majes-Camaná en la estación Huatiapa. Línea naranja (Q=210,0 m³/s), naranja (300,0 m³/s) y rojo (400,0 m³/s) corresponde a los umbrales de Alerta para la emisión de los Avisos hidrológicos

Fuente: SENAMHI-DHI

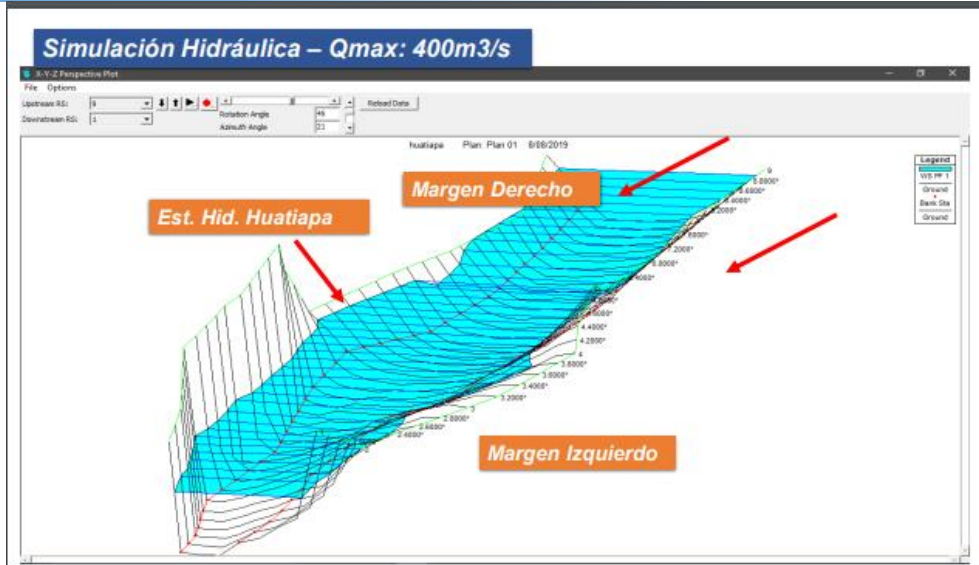


Figura 2. Salida de modelo HEC-RAS para la simulación hidráulica del área de inundación en tramo de río, tramo de 450 m. Caudal máximo 400,0 m³/s.
Fuente: SENAMHI, DZ-6, DHI

En marzo del presente año, se presentaron caudales extremos que ocasionaron problemas de inundación en el valle majes; el pico máximo de caudal se presentó el día 01 marzo, con un caudal máximo de 848,2 m³/s, para un nivel de agua de 4,23 m.

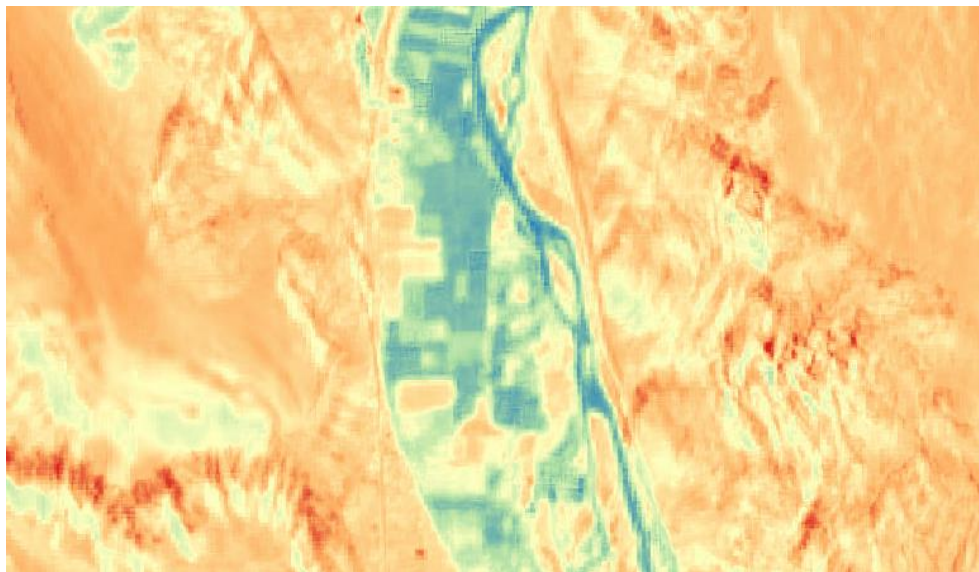


Figura 3. Imagen del Índice Normalizado del Agua (NWI) procesado con imagen de Sentinel del día 01 marzo del 2020. El área afectada por inundación (mancha verde azul) está ubicada a 1,5 Km aguas abajo de la Estación de Huatiapa.
Fuente: DHI.

En febrero del 2012, la cuenca fue impactada por la inundación provocada por un caudal extremo de 1200,0 m³/s ocurrida el 13 febrero. El nivel de agua alcanzado en la estación de Huatiapa fue de 6,07 m de acuerdo a la simulación hidráulica realizada por el SENAMHI en el 2019 sobre un tramo de río de 450 m (Figura 4 y 5).

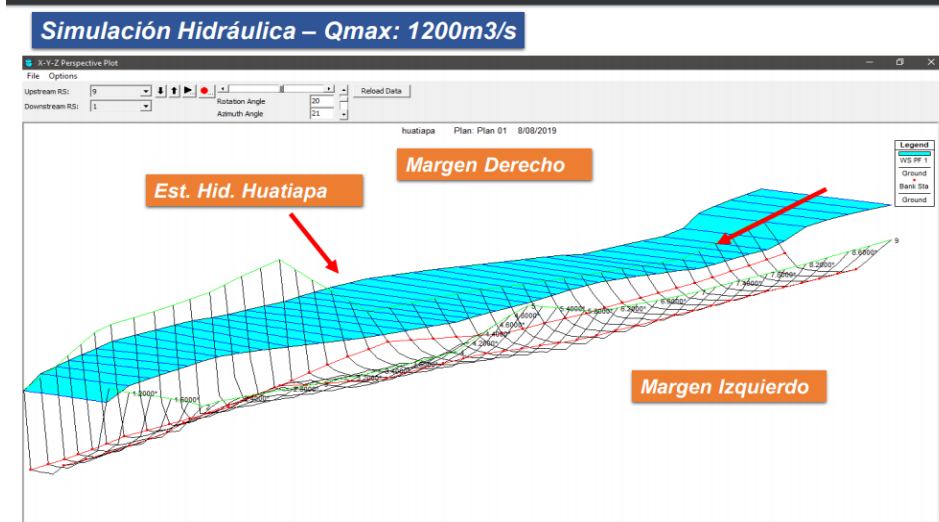


Figura 4. Salida de modelo HEC-RAS para la simulación hidráulica del área de inundación en tramo (Tramo de 450 m). Caudal máximo 1200,0 m³/s.
Fuente: SENAMHI, DZ-6, DHI

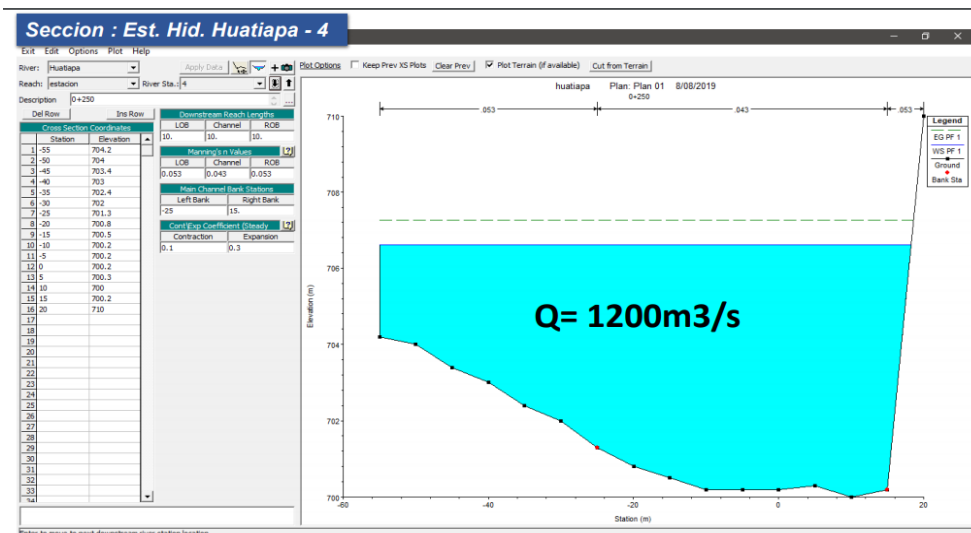


Figura 5. Sección transversal del río Majes, en la Estación de Huatiapa para la inundación del 13 de febrero del 2012.
Fuente: SENAMHI, DZ-6, DHI

4.2 Potenciales áreas de inundación para caudales extremos de 25 años, 50 años y 100 años de tiempo de retorno

En primer término, se ha realizado el análisis probabilístico para determinar los caudales máximos de avenidas a partir de los datos históricos de la estación hidrológica de Huatiapa. Estos caudales máximos de avenidas estimados para tiempos de retorno de 25, 50 y 100 años se asocian a los niveles máximos a partir de la curva de gasto de la sección de aforo.

Para evaluar las potenciales áreas de inundación en el ámbito de la cuenca Colca-Majes-Camaná se ha utilizado un modelo hidrogeomorfológico de evaluación rápida de zonas inundables basado en el Modelo Numérico de Elevación de la cuenca. La metodología del HAND (Height Above Nearest Drainage) se viene utilizando para la delimitación de zonas de inundación de grandes áreas donde no se cuenta con información cartográfica a detalle para la simulación hidráulica. Algunos autores

sugieren la aplicación de esta metodología como un paso previo para estudios hidráulicos más detallados.

La ventaja del HAND es que permite mapear diferentes planos de elevación del terreno con respecto al fondo del río a partir de un Modelo Numérico del Elevación. Para nuestro análisis se utiliza la información de los niveles máximos asociados a los caudales probabilísticos de 25, 50 y 100 años de tiempos de retorno.

Se analizó la información histórica de caudales diarios de la estación hidrológica de Huatiapa correspondiente a 22 años de registro del periodo 1998-2019.

Se seleccionaron los caudales máximos anuales en la estación de Huatiapa y se realizó el análisis probabilístico de los caudales máximos de avenidas empleando 5 funciones de distribución de probabilidad: Normal, Log-Normal 2 parámetros, Log-Normal 3 parámetros, Gumbel y Log-Gumbel.

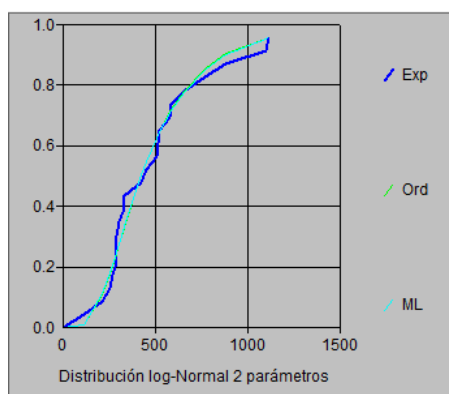


Figura 6. Caudales máximos ajustados con la distribución log-Normal 2 parámetros
Fuente: SENAMHI-DHI

Se empleó el método de bondad de ajuste de Kolmogorov Smirnov, el cual permitió determinar que la distribución log-normal de 2 parámetros es la que mejor se ajusta a los caudales máximos observados.

Tabla 1. Bondad de ajuste del caudal máximo a una FDP

Función de Distribución	Delta Teórico	Delta Tabular	Ajuste K-S
Normal	0.1519	0.29	Acepta
Log Normal 2 parametros	0.1013	0.29	Acepta
Log Normal 3 parametros	0.1328	0.29	Acepta
Gumbel	0.1253	0.29	Acepta
Log Gumbel	0.1239	0.29	Acepta

Una vez ajustados los datos históricos a la distribución log-normal de 2 parámetros, se generaron los caudales máximos en la estación Huatiapa para diferentes periodos de retorno, obteniendo los siguientes valores (Tabla 2).

Tabla 2. Caudal y niveles máximos para tiempos de retorno de 25, 50 y 100 años en estación hidrológica Huatiapa

Caudal - Nivel	TR - 25 años	TR - 50 años	TR - 100 años
Q (m ³ /s)	1371,0	1631,0	1904,0
H (m)	6,2	7,1	8,0

En las figuras se muestra el mapeo de los planos del HAND para la parte baja de la cuenca Colca-Majes-Camaná que es la zona de mayor vulnerabilidad a inundaciones. Para nuestro análisis se ha considerado el mapeo de HAND para los niveles máximos que corresponde a los caudales máximos de 25, 50 y 100 años de tiempo de retorno.

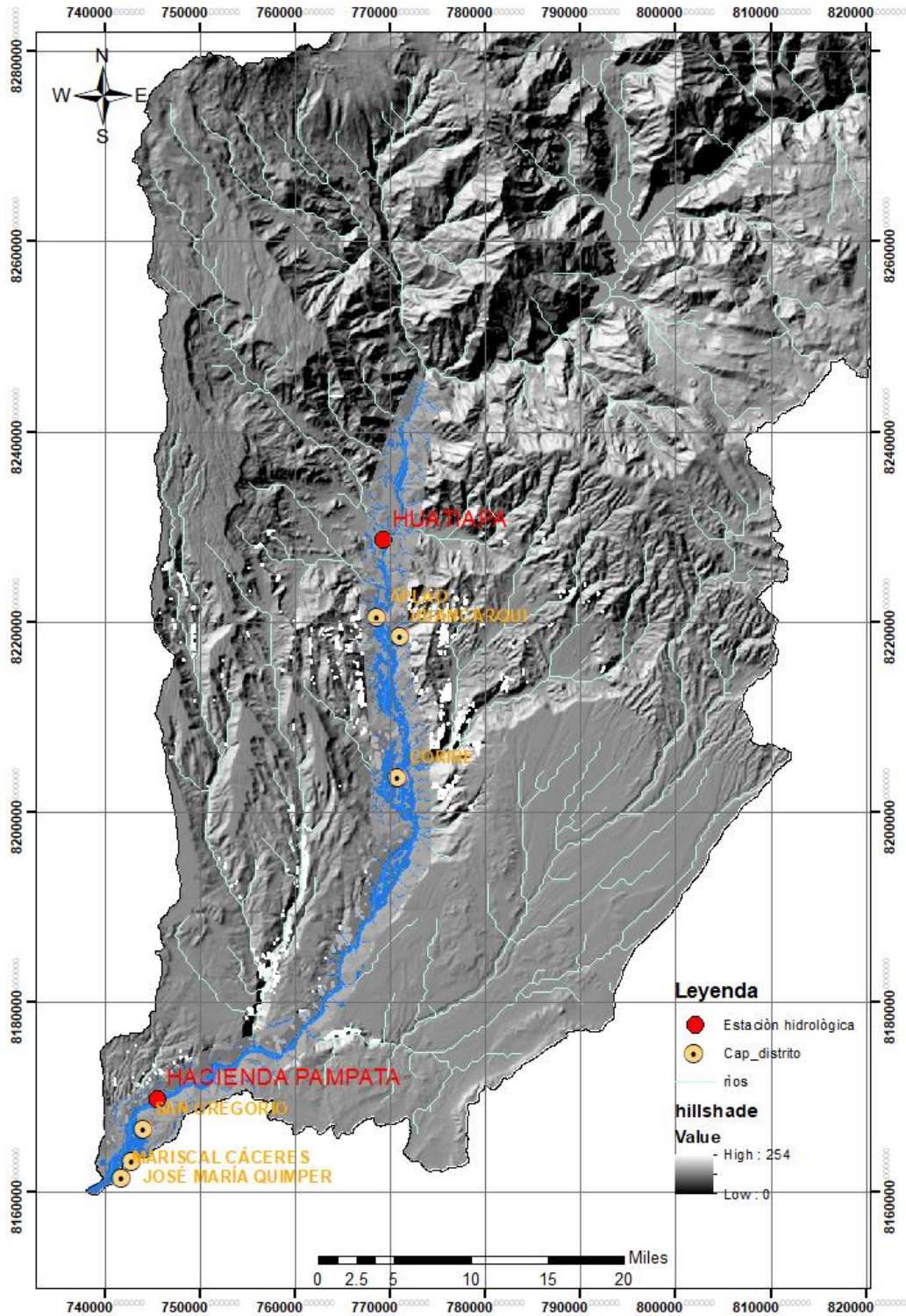


Figura 7. Mapa de zonas de inundación (azul) en base a HAND de 6,0 m correspondiente a un Caudal máximo de tiempo de retorno de 25 años. Area afectada = 950,0 Ha.
Fuente: Senamhi-DHI

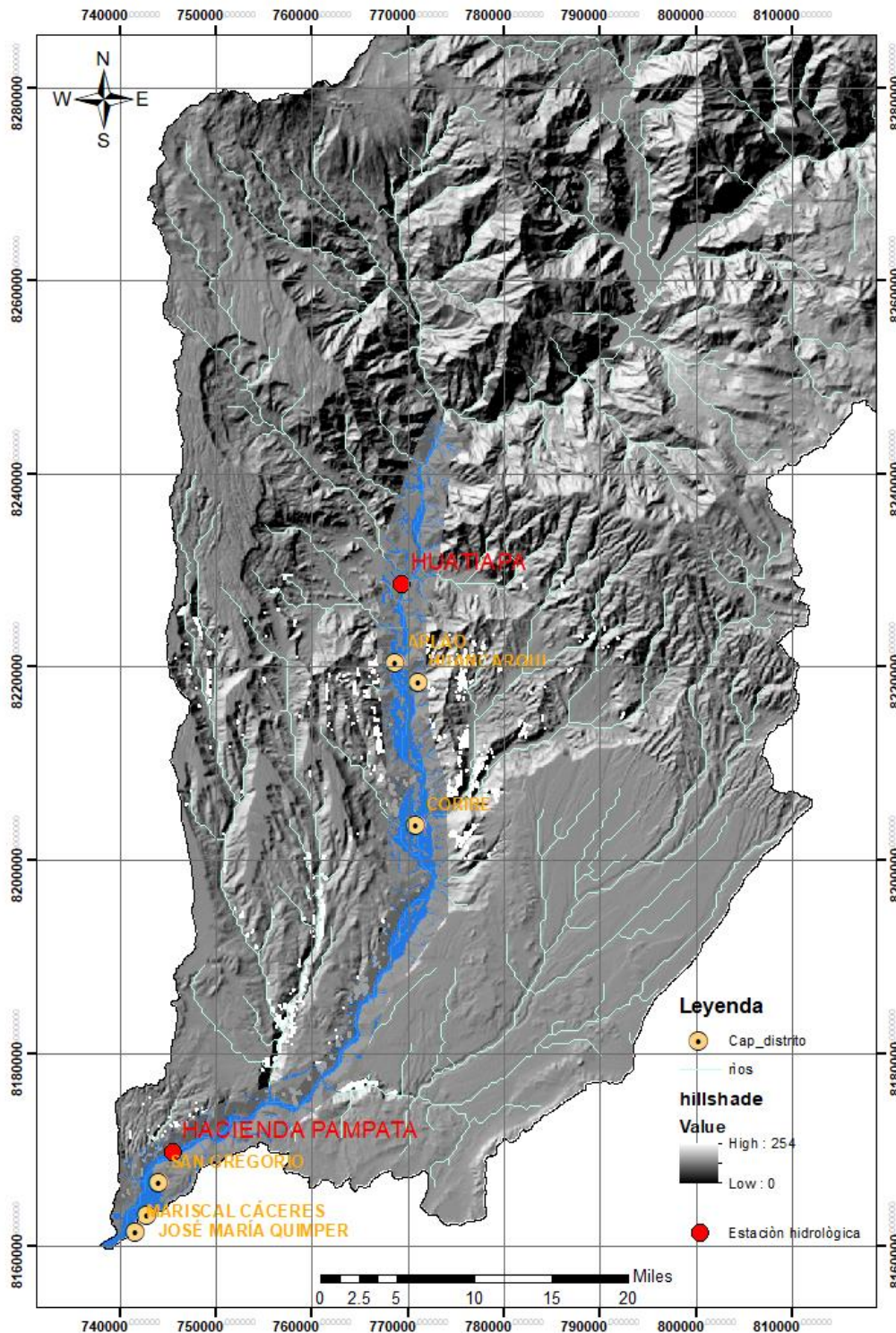


Figura 8. Mapa de zonas de inundación (azul) en base a HAND de 7,0 m correspondiente a un Caudal máximo de tiempo de retorno de 50 años. Area afectada = 1689,0 Ha.
Fuente: Senamhi-DHI

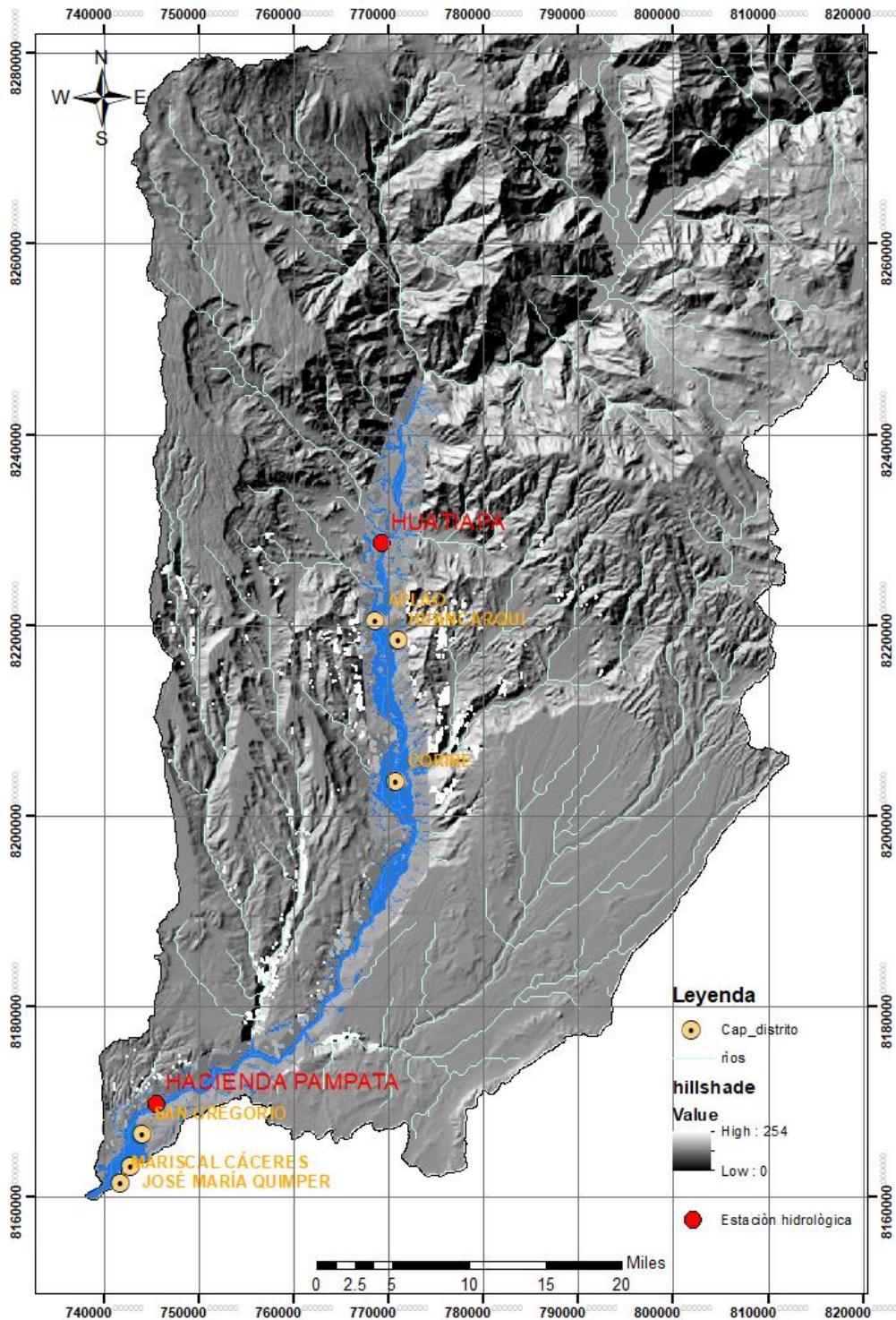


Figura 9. Mapa de zonas de inundación (azul) en base a HAND de 8,0 m correspondiente a un Caudal máximo de tiempo de retorno de 100 años. Area afectada = 3188,0 Ha.
Fuente: Senamhi-DHI

4.3 Peligros hidrológicos asociados a caudales críticos del desembalse de Achoma

Para realizar esta evaluación se parte de un escenario crítico de falla del dique durante el desembalse. Se analiza los potenciales impactos de estos caudales críticos en la parte alta y baja de la cuenca.

4.3.1 Simulación de la rotura del Dique

Las simulaciones de roturas de diques se realizaron con el modelo de Erosión de Brechas BRCH-J, basados en el modelo BREACH NWS del Servicio Meteorológico Nacional de EEUU. El cual toma en cuenta las siguientes consideraciones:

- Las elevaciones de las superficies de agua máxima, fueron aproximada en base al modelo digital de elevaciones generadas por la información tomada en campo del INGEMMET e información de las diferentes entidades como AUTODEMA y COER-Arequipa.

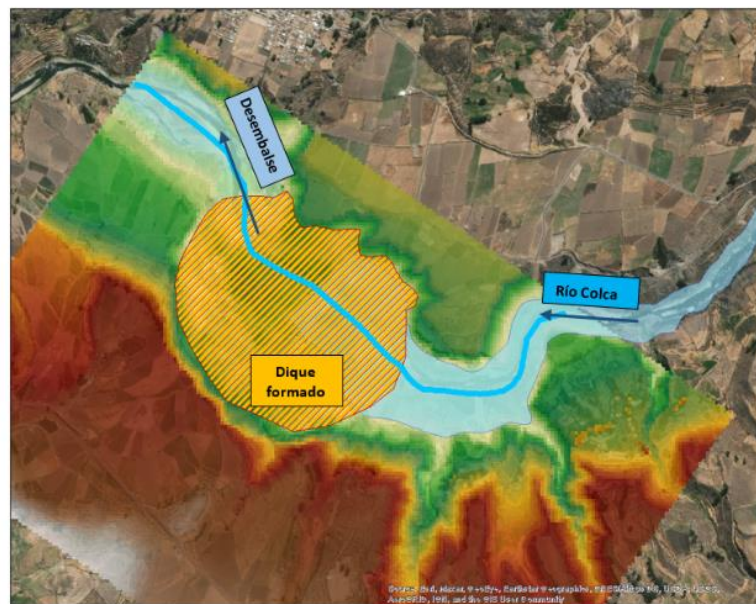


Figura 10. Modelo Digital de Elevaciones.
Fuente: SENAMHI basado en datos de INGEMMET

- Las características de las pendientes de los taludes aguas arriba y aguas abajo, y demás características geométricas se asumieron a partir del modelo digital de elevaciones generadas por la información tomada en campo del INGEMMET.

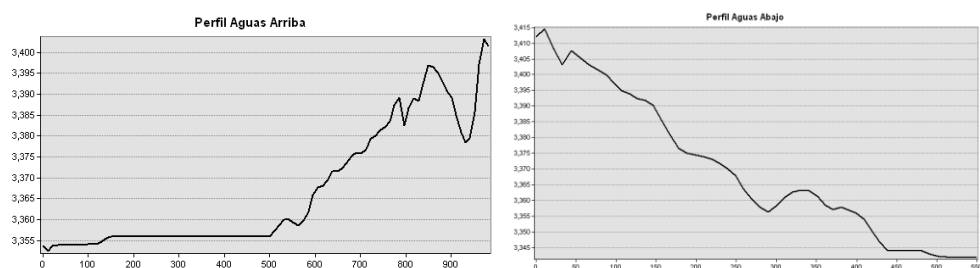


Figura 11. Perfiles longitudinales aguas arriba (izquierda) y aguas abajo (derecha)
Fuente: Senamhi

- Se incluyó un flujo de entrada, aunque al ser constante, aproximado a los 2 m³/s, no fue sensible una vez iniciada la posible falla por sobrepaso

(overtopping breach). Se asumió este tipo de falla, pues según los reportes geotécnicos de SOUTHERN PERU indican ausencia de humedad, además que el embalse tiene una sección longitudinal aproximadamente de 850 m a lo largo del río Colca.

- La curva altura-área de superficie del reservorio, fue estimada en base a un DEM de ALOS PALSAR de la Agencia Japonesa de Exploración Aeroespacial.
- Los parámetros de brecha se determinaron para una falla por sobrepaso, el principio que se encuentra en este tipo de falla, es que una vez que existe un sobrepaso o inundación del agua sobre la corona del dique, este empieza a erosionar en las zonas más frágiles e iniciar una brecha la cual se va extendiendo a lo largo de la altura del dique, la cual es establecida en base a la características hidráulicas de la brecha formada en la parte superior del dique. El segundo mecanismo está asociado a la estabilidad de las pendientes del suelo. Se consideró además una altura máxima de 40 metros.
- Se acotó el desembalse hasta un ancho en la parte superior de 75 metros y en la parte inferior hasta 45 metros, con lo que no se considera un desembalse total.

Los resultados principales del modelo arrojan un caudal máximo de salida alrededor de 1,800 m³/s para las consideraciones dadas, alcanzando dicha descarga en un aproximado de 2.22 horas iniciada la falla.

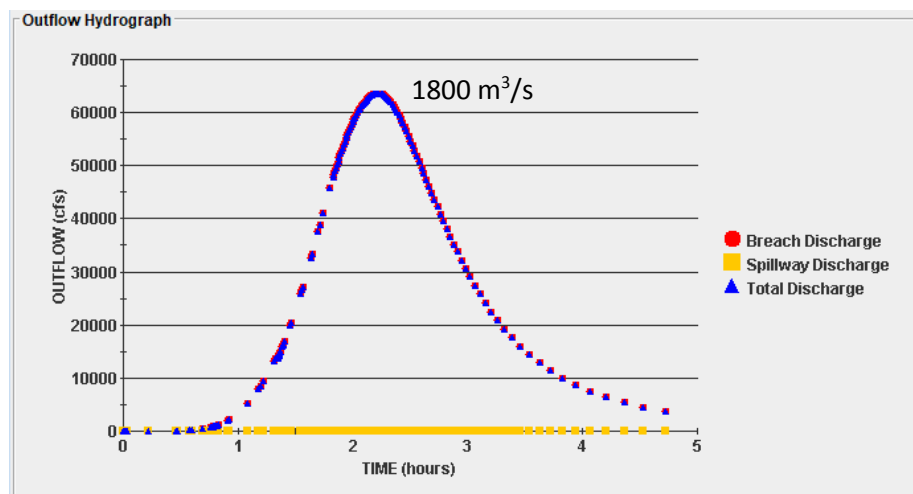


Figura 12. Hidrograma de salida del modelo en unidades inglesas (pies cúbicos por segundo)
 Fuente: Senamhi-DHI

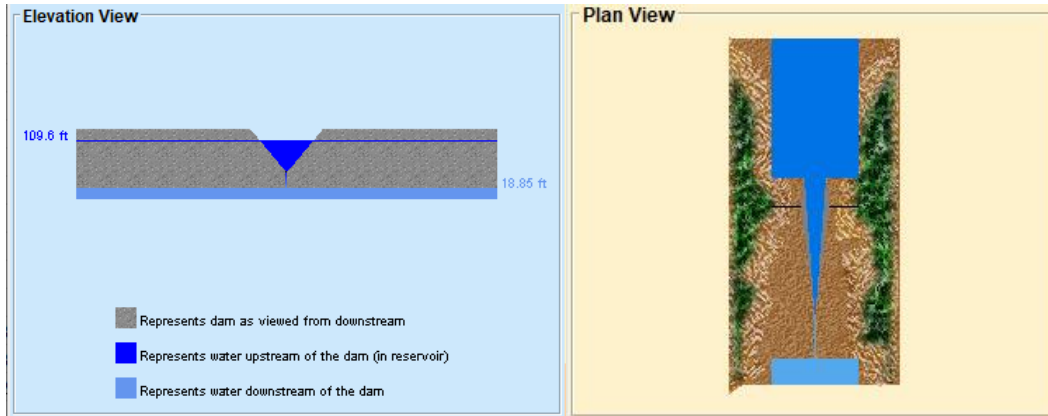


Figura 13. Vista del modelo en elevación (izquierda) y en planta (derecha)
Fuente: Senamhi-DHI

4.3.2 Peligros hidrológicos en la Cuenca del Alto Colca

- En la cuenca alta del río Colca, en la zona de Anchoma se ha estimado por la metodología del HAND-maning la curva sintética que relaciona la profundidad del río con el caudal. Esta se construye con diferentes planos de profundidad y la estimación del caudal por la ecuación de Manning. Por otro lado la simulación de los caudales de falla del dique dan valores de pico de descarga que puede alcanzar 1800.0 m³/s, en el escenario más crítico; por lo tanto el máximo nivel de agua que alcanzaría el río Colca aguas abajo del dique puede llegar a 7.4 m.

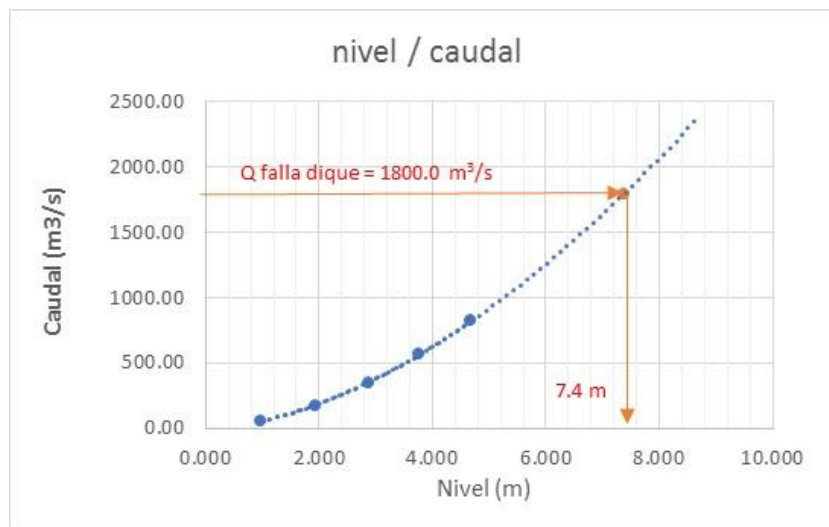


Figura 14. Curva sintética Nivel – caudal en curso del río Colca aguas abajo del Dique de Achoma.
Fuente: Senamhi-DHI

En el tramo comprendido a la salida del Dique de Achoma y la localidad de Madrigal los centros poblados se encuentran en una cota muy superior por encima de este nivel máximo de 7.4 m, por tanto el nivel de riesgo es mínimo, tal como se ilustra en las figura 15 y 16; sin embargo en zona de acceso al río para desarrollo de actividades agrícolas y pecuarias puede verse impactada por lo que el acceso y tránsito durante el desembalse debe restringirse.



Figura 15. Profundidad de agua para un plano de HAND de 8.0 m aguas abajo de del Dique Achoma (1). Fuente: Google, Senamhi.



Figura 16. Profundidad de agua para un plano de HAND de 8m aguas debajo de del Dique Achoma (2). El la sección transversal corresponde del río corresponde al corte 1-1
 Fuente: Google, Senamhi.

4.3.3 Peligros hidrológicos en la Cuenca baja Majes-Camaná

Ante un escenario de falla del dique de Achoma con un caudal pico aproximado de 1800,0 m³/s, la onda de crecida se propagaría hasta la estación de Huatiapa en 5.0 horas aproximadamente.

Este pico de caudal llegaría amortiguado en Huatiapa con aproximadamente 1000.0 m³/s, superando el umbral de peligro de inundación fijado en 400.0 m³/s.

Las zonas de mayor impacto por la crecida del río serían El Monte, Querullpa y Ongoro, en Aplao; mientras que en Corire, zonas como El Dique, San Vicente, Goyeneche, Sahuani.

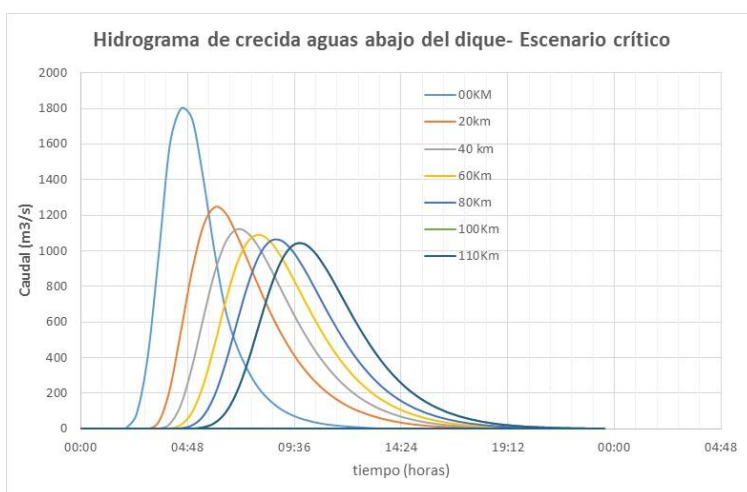


Figura 17. Hidrograma de crecida del río Colca-Majes-Camaná ante un escenario de falla de dique de Achoma

Fuente: SENAMHI

V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

- En la estación de Hidrológica de Huatiapa el SENAMHI realiza la Vigilancia hidrológica de la cuenca Colca-Majes-Camaná y en ese punto de control ha establecido los umbrales del peligro de inundación para la emisión de los Avisos hidrológicos de crecida del río.
- El umbral de Alerta roja, que corresponde al máximo nivel de Alerta de Inundación ha sido establecido en 400.0 m³/s, basado en la simulación hidráulica en un tramo de 450.0 m del río Majes a la altura de la Estación hidrológica de Huatiapa.
- Durante el mes de marzo del presente año la cuenca experimentó eventos intensos de lluvias que provocaron inundaciones. El 1ro de marzo se alcanzó un caudal pico de 848.0 m³/s y se reportaron daños en zonas de cultivos del valle de Majes.

- En febrero de 2012 se presentó el caudal más alto de los últimos 10 años, alcanzando un pico de 1200.0 m³/s. La inundación generada por esta crecida impactó los valles de Majes y Camaná.
- Los caudales máximos de avenidas estimados mediante el ajuste de modelos probabilísticos son de 1371.0 m³/s, 1631.0 m³/s y 1904.0 m³/s para tiempos de retorno de 25 años, 50 años y 100 años, respectivamente. Los niveles de agua asociados a estos máximos caudales son de 6.2 m, 7.1 m y 8.0 m, respectivamente, en la estación de Huatiapa.
- Para los caudales estimados con tiempo de retorno de 25 años, 50 años y 100 años se ha determinado que la superficie afectada por inundación podría alcanzar las 950.0 ha, 1689.0 ha y 3200 ha, respectivamente.
- En relación a los potenciales peligros asociados al desembalse del dique de Achoma en la parte alta del río Colca, la simulación de un escenario de rotura del dique da un caudal pico de descarga de 1800.0 m³/s. Para este escenario crítico, en el tramo del río a la salida del dique se esperaría que el nivel de agua ascienda hasta 7.4 m.
- La población de Ichupampa, Achoma, Maca, Lari y Madrigal está asentada en una cota superior a este nivel máximo de agua estimado para el escenario crítico de rotura; por lo tanto es poco probable su afectación; sin embargo en la zona de acceso del río puede haber afectación por desarrollo de actividades agrícolas, pecuarias.
- En la parte de baja del río Majes, ante el escenario crítico de rotura del dique, el pico de caudal llegaría amortiguado en aproximadamente 1000.0 m³/s y con un tiempo de tránsito de 5.0 horas desde la zona del dique hasta la estación de Huatiapa. Con este escenario de caudal se estaría superando el umbral crítico de inundación de 400.0 m³/s establecido en la estación de Huatiapa, impactando las localidades de El Monte, Querullpa y Ongoro, en Aplao; mientras que en Corire, zonas como El Dique, San Vicente, Goyeneche, Sahuani.

5.2 Recomendaciones

- Establecer el protocolo de Alerta para las operaciones del desembalse.
- Mantener informados a la población para evitar el desarrollo de actividades en los sitios identificados con potencial de inundación.

VI. BIBLIOGRAFÍA

7.1 Nobre, Antonio Donato; Luz Adriana Cuartas, Marcos Rodrigo Momo, Dirceu Luís Severo, Adilson Pinheiro, and Carlos Afonso Nobre, 2016. HAND contour: A new proxy predictor of inundation extent. Hydrological Processes 30(2): 320-333. DOI: 10.1002/hyp.10581

- 7.2 Nippon Koei Latin America – Caribbean Co. 2013.** Informe principal informe del proyecto (río Majes-Camaná) Programa de protección de valles y poblaciones rurales y vulnerables ante inundaciones en la República del Perú. Ministerio de Agricultura.
- 7.3 SENAMHI, 2020.** Reportes de Vigilancia hidrológica de la Cuenca Colca-Majes-Camaná. Subdirección de Pronóstico hidrológico.
- 7.4 Zheng, X., D. G. Tarboton, D. R. Maidment, Y. Y. Liu and P. Passalacqua, (2018),** "River Channel Geometry and Rating Curve Estimation Using Height above the Nearest Drainage," JAWRA Journal of the American Water Resources Association, 54(4): 785-806, <http://doi.org/10.1111/1752-1688.12661>.