

Proyecto “Diagnóstico del estado de vulnerabilidad de tres comunidades ribereñas de los ríos Coca y Napo frente a la erosión regresiva en la parte alta del río Coca”



Análisis del Proceso Erosivo Ocasionado por la Desaparición de la Cascada de San Rafael – Río Coca: Origen – Impactos

PRODUCTO 1

Preparado por:

alfredo carrasco valdivieso



Contrato



Elaborado para



Financiado por

GORDON AND BETTY
MOORE
FOUNDATION

Quito, junio de 2022

El presente documento debe citarse de la siguiente manera:

Carrasco V. A. 2022. Análisis del Proceso Erosivo Ocasionado por la Desaparición de la Cascada de San Rafael – Río Coca: Origen – Impactos. Informe 1. Proyecto “Diagnóstico del estado de vulnerabilidad de tres comunidades ribereñas de los ríos Coca y Napo frente a la erosión regresiva en la parte alta del río Coca”. Corporación Grupo Randi Randi / Wildlife Conservation Society / Gordon and Betty Moore Foundation. Quito.

Fotos de la portada: Alfredo Carrasco Valdivieso ©

Todas las fotografías que están incorporadas en el cuerpo del informe son propiedad de los autores que se citan en las mismas.

Comentarios y sugerencias al presente documento dirigirse a: alercaval@gmail.com / cgrandirandi@gmail.com

DESCARGO DE RESPONSABILIDAD:

El contenido de este informe, realizado bajo contrato con la Corporación Grupo Randi Randi, es responsabilidad exclusiva del autor. En ningún caso se debe considerar que refleja la opinión de Wildlife Conservation Society, entidad para la que se preparó el estudio; ni de Gordon and Betty Moore Foundation, organización que lo financió.

Este trabajo se lo realizó en el marco del proyecto “Diagnóstico del estado de vulnerabilidad de tres comunidades ribereñas de los ríos Coca y Napo frente a la erosión regresiva en la parte alta del río Coca”, financiado por Wildlife Conservation Society, con recursos de Gordon and Betty Moore Foundation, mediante contrato con la Corporación Grupo Randi Randi.

Agradecimientos:

Dejo expreso mi agradecimiento a todos los que colaboraron con sus observaciones, opiniones y aportes en la preparación del presente informe. En especial a Bernardo Beate, Jorge Sevilla, Patricio Ramón, Gonzalo Duerto, Susan Poats, Carla Valdospinos y Gabriela Ramón; a los miembros de las comunidades de San Luis, Minas de Huataraco y Amarun Mesa. A todos quienes muy gentilmente compartieron sus fotografías – todos ellos citados al pie de cada foto-. Especial agradecimiento a Randi Randi, a Wildlife Conservation Society y a Gordon and Betty Moore Foundation.

Quito, 6 de junio del 2022

ÍNDICE

1	RESUMEN EJECUTIVO	1
2	INTRODUCCIÓN	5
3	METODOLOGÍA EMPLEADA	8
4	ANTECEDENTES	9
5	EL ALTO COCA	11
5.1	UBICACIÓN GEOGRÁFICA	11
5.2	ASPECTOS FÍSICO NATURALES	11
5.2.1	<i>Hidrografía</i>	11
5.2.2	<i>Clima</i>	11
5.2.3	<i>Geomorfología</i>	12
5.2.4	<i>Geología</i>	12
5.3	ACTIVIDAD SÍSMICA.....	14
5.4	ACTIVIDAD VOLCÁNICA: VOLCÁN REVENTADOR	16
5.5	RESEÑA HISTÓRICA: EL REVENTADOR - EL RÍO COCA - CASCADA DE SAN RAFAEL	16
5.5.1	<i>El Reventador</i>	16
5.5.2	<i>Río Coca o Río Quijos</i>	18
5.5.3	<i>Cascada del Coca (San Rafael)</i>	20
6	DESAPARICIÓN DE LA CASCADA.....	22
6.1	DESAPARICIÓN DE LA CASCADA: HIPÓTESIS	25
6.1.1	<i>Aguas Hambrientas o Aguas Blancas</i>	25
6.1.2	<i>Origen Natural</i>	27
6.1.3	<i>Aguas Subterráneas y su papel en la Erosión de la Base</i>	33
6.2	EFFECTOS DE PROCESO EROSIVO	36
6.2.1	<i>Transporte de Sedimentos</i>	36
6.2.2	<i>Erosión en los Ríos que Drenan en el Río Coca</i>	42
6.3	IMPACTOS DEL ACTUAL PROCESO EROSIVO	43
6.3.1	<i>Proyecto Hidroeléctrico Coca Codo Sinclair (PHCCS)</i>	47
6.3.1.1	Represa de captación de agua para la central hidroeléctrica / Túnel de Restitución	48
6.3.2	<i>Estación de bombeo «El Salado»</i>	49
6.3.3	<i>San Luis</i>	49
6.3.4	<i>Impactos Económicos</i>	51
7	ACCIONES DESARROLLADAS POR ENTIDADES DEL ESTADO	52
8	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	57
8.1	CONCLUSIONES	57
8.2	RECOMENDACIONES	59
9	ANEXO 1: CAMBIO MORFOLÓGICO DE LA CASCADA SAN RAFAEL: FOTOGRAFÍAS 1944 - 2022	61

MAPAS

MAPA 1: LEVANTAMIENTO PARTICIPATIVO DE RIESGOS EN LA CUENCA DEL RÍO COCA	7
MAPA 2: MAPA TOMADO DE: LA MISIÓN DEL NAPO, POR EL P. L. S., S.J.1894, ELABORADO "POR UN PADRE DE LA COMPAÑÍA DE JESÚS". EN ESTE SE SEÑALA EL POBLADO "POR UN PADRE DE LA COMPAÑÍA DE JESÚS". EN ESTE SE SEÑALA EL POBLADO DE "S. RAFAEL", Y SE GRAFICA EL CURSO DEL RÍO COCA.	18
MAPA 3: MAPA GEOLÓGICO DE LA ZONA DE SAN-RAFAEL - VALLE DEL RÍO COCA. FORMACIONES LITOLÓGICAS Y LA ESTRATIGRAFÍA GENERAL DEL SAN-RAFAEL Y DEL REVENTADOR MODIFICADAS DE INECEL (1988). FUENTE: REYES ET. AL. 2021.....	27

TABLAS

TABLA 1: IMÁGENES SATELITALES DEL PROCESO DE CAMBIO SUPERFICIAL AGUAS ARRIBA DE LA CASCADA.	31
--	----

ILUSTRACIÓN

ILUSTRACIÓN 1: COLUMNA ESTRATIGRÁFICA DONDE SE EMPLAZA EL PHCCS. FUENTE: CÉSAR VÁSQUEZ, 2011. TOMADO DE: ESIA EXPOST Y PMA PARA EXPLOTACIÓN DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN ÁREA DE PRÉSTAMO COCA CODO XI..	12
ILUSTRACIÓN 2: EMPLAZAMIENTO FLUJO DE LAVA. (1), PROCESO EROSIVO (2 Y 3), AGUAS SUBTERRÁNEAS (4).	28
ILUSTRACIÓN 3: PROCESO EROSIVO – DESAPARICIÓN DE LA CASCADA Y EL ARCO.....	33
ILUSTRACIÓN 4: INICIO DE SUMIDERO POR ACCIÓN PSEUDOKÁRSTICA (5). SUMIDERO SE FORMA A LO LARGO DEL CONTACTO DEL FLUJO CON MATERIALES QAL Y AVL 2.....	35
ILUSTRACIÓN 5: VARIANTES (7) REALIZADAS POR PETROECUADOR EN EL 2021. FUENTE: GERENCIA PETROECUADOR.	47

IMÁGENES

IMAGEN 1: SENTINEL-2 19 10 2018. INCIPIENTE DEPRESIÓN EN LA COBERTURA VEGETAL.	31
IMAGEN 2: PLANET NICFI (MOZAICO) 01 12 2018. INCIPIENTE DEPRESIÓN EN LA COBERTURA VEGETAL.	31
IMAGEN 3: PLANET 15 02 2019 DEPRESIÓN EN COBERTURA VEGETAL (CÍRCULO ROJO).	31
IMAGEN 4: SENTINEL 27 05 2019, DEPRESIÓN EN COBERTURA VEGETAL (CÍRCULO BLANCO)	31
IMAGEN 5: SENTINEL 25 06 2019, DEPRESIÓN EN COBERTURA VEGETAL (CÍRCULO ROJO).....	32
IMAGEN 6: SENTINEL 03 07 2019, DEPRESIÓN EN COBERTURA VEGETAL (CÍRCULO ROJO).....	32
IMAGEN 7: IMAGEN PLANET 19 08 2019, DEPRESIÓN EN LA COBERTURA VEGETAL (CÍRCULO ROJO).	32
IMAGEN 8: SENTINEL 2 19 09 2019. SUMIDERO.....	32
IMAGEN 9: PLANET OCTUBRE 2019.	32
IMAGEN 10: PLANET 28 01 2020	32
IMAGEN 11: PLANET. SOBRE POSICIÓN DE IMÁGENES QUE ILUSTRAN LA MAGNITUD DEL PROCESO EROSIVO AGUAS ARRIBA DE LO QUE FUE LA CASCADA (ESQUINA SUPERIOR DERECHA) Y LA CONFLUENCIA DEL RÍO MALO EN EL COCA. EN BLANCO EL CAUCE DEL RÍO COCA EN AL 01 DICIEMBRE DEL 2019 (APROX. 126 HA.), EN OSCURO EL ÁREA EROSIONADA AL 01 JUNIO DEL 2022 (APROX. 382 HA.).....	36
IMAGEN 12: SENTINEL IR 2 IMÁGENES QUE COMPARAN EL COMPORTAMIENTO DEL RIO COCA EN EL 04 10 2019 CON EL DEL 13 10 2021 EN EL TRAMO QUE CORRESPONDE A UNOS 12 KM AGUAS ARRIBA DEL PASO HISTÓRICO Y UNOS 4.0 KM AGUAS ABAJO DEL PASO.	37
IMAGEN 13: CURSO DEL RÍO COCA EN PLANICIE AMAZÓNICA. 2019 (BLANCO) 01 2022 (CAFÉ PARDO).	38
IMAGEN 14: IMÁGENES SENTINEL IR. COMPORTAMIENTO DEL RÍO COCA EN EL SECTOR DE MINAS DE HUATARACO (MARGEN DERECHA) Y TOYUCA (MARGEN IZQUIERDA). EN BLANCO EL CAUCE DEL RÍO AL 10 12 2019; EN GRIS EL COMPORTAMIENTO AL 28 01 2022	38
IMAGEN 15: IMÁGENES SENTINEL FC. TRAMO DEL RÍO COCA (PUENTE DE SAN SEBASTIÁN DEL COCA – DESEMBOCADURA EN EL RIO NAPO / DESEMBOCADURA R.C. - R.N HASTA AMARUN MESA. EN BLANCO CAUCE DE LOS RÍOS AL 26 09 2019 – EN GRIS EL CAUCE DE LOS RÍOS AL 08 01 2022.....	39
IMAGEN 16: IMÁGENES SENTINEL FC. AMARUN MESA SOBRE PUESTAS: 28 07 2018 (AMARILLO) 04 01 2020 (BLANCO) Y 02 06 2022 (GRIS OSCURO). RESALTA EROSIÓN EN ESPECIAL EN MARGEN IZQUIERDA RÍOS NAPO Y COCA.	40
IMAGEN 17: GOOGLE EARTH: COMPORTAMIENTO DE LOS RÍOS COCA Y NAPO (ZONA DE CONFLUENCIA) ENTRE 1985 Y 2018.	40
IMAGEN 18: CONFLUENCIA DEL RÍO MALO CON EL R. COCA: COMPARACIÓN DE IMÁGENES OBTENIDAS DE ORTOFOTOS DEL IGM (15 09 2021 - 27 04 2022).	43
IMAGEN 19: FOTO DE GOOGLE EARTH (09 2013) DE LA CONFLUENCIA DEL RÍO MALO EN EL RÍO COCA.....	43
IMAGEN 20: SAN LUIS / PIEDRAS FINAS _ RIO COCA. AVANCE DEL PROCESO EROSIVO ENTRE JULIO 2021 Y ABRIL 2022.....	50
IMAGEN 21: ÁREA DE ANÁLISIS DE SAN LUIS: 60 HA. EN 23 MESES SE REDUJO A 34.4 HA.....	50

FOTOS

FOTO 1: PASO HISTÓRICO SOBRE EL RÍO COCA, CRUZA UNA GARGANTA DE NO MÁS DE 6M DE ANCHO (FOTO IZQUIERDA). EL RÍO COCA SE ENCAÑONA, EL CAUCE NO TIENE MÁS DE 25M DE ANCHO EN EL FONDO (FOTO DERECHA).....	19
FOTO 2: CASCADA AGOYÁN 1950? (FOTO: ROLF BLOMBERG) Y EN EL 2021 (FOTO. JORGE SEVILLA), EVIDENCIA LA MAGNITUD DEL PROCESO EROSIVO DE LA MISMA EN 70 AÑOS.	24
FOTO 3: FLUJO DE LAVA QUE FORMÓ LA CASCADA DE SAN RAFAEL ASENTADA SOBRE BRECHAS DEL REVENTADOR BASAL (FOTO TOMADA DE VIDEO BOOFSESSIONS).	28
FOTO 4: CAUDAL DEL RÍO COCA EN LA CASCADA DE SAN RAFAEL. LOS CAUDALES HABRÍAN SUPERADO LOS 5.000M3. (FOTO: @JUCAVILLFTE, 12 04 2020).	29
FOTO 5: MARGEN IZQUIERDA DEL RÍO COCA, A UNOS 250M AGUAS DEBAJO DE LA CASCADA. VERTIENTES QUE SURGEN EN EL CONTACTO DE MATERIALES VOLCÁNICOS / COLUVIALES / ALUVIALES Y LA FORMACIÓN MISAHUALLÍ?. (FOTO MANUEL PALLARES 31 01 2021).	33
FOTO 6: CUEVA AL PIE DE LA CASCADA DE SAN RAFAEL. NÓTESE LA PRESENCIA DE AFLORAMIENTOS DE AGUA SUBTERRÁNEA (VERTIENTES), ADEMÁS LA PROFUNDIDAD DE LA CUEVA (FOTO TOMADA DE UN VIDEO AFICIONADO DEL 20 02 2018).	34
FOTO 7: CAUDAL RÍO COCA (6.000 m3/s) SUPERA BARRERA DE ENTRE 6M - 8M DE ALTO DEL CANAL DE RESTITUCIÓN QUE CANALIZA LAS AGUAS TURBINADAS DEL PHCCS. SE ESTIMA QUE EL ESPESOR DE SEDIMENTOS DEPOSITADOS EN ESTE TRAMO DEL RÍO SUPERA LOS 3M. FUENTE FOTO: PONENCIA DE JORGE SEVILLA).....	37
FOTO 9: GARZA BLANCA (<i>ARDEA ALBA</i>) AFECTADA POR EL DERRAME DE CRUDO DEL 28 ENERO DEL 2022. RÍO COCA SECTOR GUAYUSA.	44
FOTO 9: CRUDO EN LAS ORILLAS DEL RÍO COCA.	44
FOTO 10: VÍA ALTERNA CONSTRUIDA POR LOS POBLADORES DE SAN LUIS Y EL REVENTADOR EN EL SECTOR DE PIEDRAS FINAS	44
FOTO 11: EJEMPLO DE EROSIÓN LATERAL POR ESCORRENTÍA SUB-SUPERFICIAL - SECTOR RÍO MONTANA (FOTO: EMILIO COBO, 12 07 2021).	46
FOTO 12: VARIANTE DE LOS OLEODUCTOS (SOTE - OCP) AL INGRESO A LO QUE FUE LA CASCADA DE SAN RAFAEL (FOTO: ALFREDO CARRASCO VALDIVIESO 06 2020).....	47
FOTO 13: POBLADO DE SAN LUIS, A LA IZQUIERDA EL RÍO COCA, A LA DERECHA E45 COLAPSADA. (FOTO: ALFREDO CÁRDENAS, EL UNIVERSO 27-05-2021).	49
FOOT 14: HEINRICH GOLDSCHMID (1944).	61
FOTO 15: PAUL SCHAUENBERG (1968)	61
FOTO 16: SIMÓN BUSTAMANTE (1970).	61
FOTO 17: GOTTFRIED HIRTZ (1976)	62
FOTO 18: ALFREDO CARRASCO VALDIVIESO (MARZO 1987).....	62
FOTO 19: SUSAN POATS (1996).	63
FOTO 20: MARCELA GARCÍA (2000).....	63
FOTO 21: PATRICIO RAMÓN (1 09 2003).....	63
FOTO 22: ALFREDO CARRASCO VALDIVIESO (16 03 2006).....	64
FOTO 23: JUAN DIEGO PÉREZ (2008)	64
FOTO 24: JUAN CARRASCO VALDIVIESO (2013)	64
FOTO 25: ERIC MOHL (SAN RAFAEL FEBRERO 2014 – SEPTIEMBRE 2015).....	65
FOTO 26: PANCHO IB - NOVIEMBRE 2017.	65
FOTO 27: PATRICIO RAMÓN (13 11 2019): LA “NUBE” QUE SE OBSERVA CORRESPONDE A QUE EL AGUJERO QUE SE FORMÓ (SUMIDERO) ESTÁ ACTUANDO COMO CHIMENEA, ARRASTRANDO EL VAPOR DE AGUA QUE SE PRODUCE POR LA CAÍDA DE LA CASCADA EVIDENCIA DE QUE YA EXISTÍA UNA CONEXIÓN CON LA CUEVA DE LA BASE DE LA CASCADA.	66
FOTO 28: LUIS ALULEMA (17 11 2019): EN EL COSTADO INFERIOR DERECHO DE LA CUEVA, SE OBSERVA MATERIAL DESPRENDIDO DEL TECHO.....	66
FOTO 29: FOTO VIDEO @BOOFSESSIONS (02 2020 – PUBLICADO 08 05 2020)	67
FOTO 30: ALFREDO CARRASCO VALDIVIESO (MAYO 2020).....	67
FOTO 31: RIESGOS ECUADOR @RIESGOS_Ec (15 02 2021): COLAPSO DEL ARCO.	68
FOTO 32: ALFREDO CARRASCO VALDIVIESO (2022)	68

ACRÓNIMOS

AVL1	Avalancha 1
AVL2	Avalancha 2
BAN	Bloque Andino Norte
BRB	Brecha Reventador Basal
CCPP	Chingual-Cosanga-Pallatanga-Puná
CELEC	Corporación Eléctrica Ecuatoriana
CGRR	Corporación Grupo Randi Randi
CHCCS	Central Hidroeléctrica Coca Codo Sinclair
CHRC	Cuenca Hidrográfica del Río Coca
ESPE	Escuela Politécnica del Ejército
GAD	Gobierno Autónomo Descentralizado
INECEL	Instituto Ecuatoriano de Electrificación
MAATE	Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica del Ecuador
MAE	Ministerio del Ambiente
MAG	Ministerio de Agricultura y Ganadería
MTOP	Ministerio de Transporte y Obras Públicas
OCP	Oleoducto de Crudos Pesados
OCP	Oleoducto de Crudos Pesados
ONG	Organización No Gubernamental
PDOT	Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial
SENAGUA	Secretaría Nacional del Agua
SNAP	Sistema Nacional de Áreas Protegidas
SNGRE	Servicio Nacional de Gestión de Riesgos y Emergencias
SOTE	Sistema de Oleoducto Transecuatoriano
SOTE	Sistema de Oleoducto Transecuatoriano
WCS	<i>Wildlife Conservation Society</i>

1 RESUMEN EJECUTIVO

Wildlife Conservation Society (WCS), Programa Ecuador, convocó a varias organizaciones para realizar un diagnóstico del estado de vulnerabilidad de tres comunidades ribereñas de los ríos Coca y Napo frente a la erosión regresiva en la parte alta del río Coca. La Corporación Grupo Randi Randi (CGRR), fue la entidad a la que se encargó que realice la investigación. La consultoría se inició en enero de 2022, en la primera fase realizó el levantamiento de información para tener una panorámica de la situación del río Coca, tanto aguas arriba de la cascada, como río abajo hasta la ciudad de Coca e incluyó un tramo del río Napo entre la bocana del río Coca y el recinto Pompeya. Tres son los informes que presenta el CGRR, de ellos el presente constituye el Informe 1 que presenta un síntesis analítica de la historia geológica/ambiental del río Coca y los orígenes de la actual situación de erosión regresiva. El segundo informe, comprende un inventario analítico de los planes de desarrollo territorial y planes de emergencia de la zona del diagnóstico. El tercer informe analiza las percepciones locales sobre la erosión regresiva del río Coca.

El 2 de febrero del 2020, la cascada de San Rafael desapareció. Las aguas que de salto natural comenzaron a fluir por debajo de un arco que se formó hacia la base de la cascada, creada por un flujo de lava, proveniente del volcán El Reventador, que represó el curso del río Coca entre 8000 y 12 000 años. La prensa nacional se hizo eco de este singular acontecimiento, a la vez que algunos profesionales alertaron sobre las consecuencias de este evento tanto para la infraestructura situada aguas arriba como para los centros poblados tanto de aguas arriba de la cascada como los situados aguas abajo. Se alertó sobre el impacto que tendría para la economía nacional.

La cascada de San Rafael estuvo ubicada, en la vertiente oriental de la Cordillera Real, en los límites de las provincias de Napo y Sucumbíos, en la zona de transición entre la cordillera Andina y la Amazonía del Ecuador, en el Parque Nacional Cayambe Coca; tenía una altura aproximada de 140 metros y unos 60 metros de ancho. Esta cascada constituía un importante y emblemático atractivo turístico, no solo de la zona, sino también del país.

La desaparición de la cascada fue un evento ampliamente difundido por la prensa nacional e internacional; analizado también por organizaciones y profesionales interesados en el tema. Se debatió sobre el origen de la desaparición -antrópico o natural-, así como sobre las consecuencias de este proceso en obras de infraestructura y de asentamientos humanos. El proceso de desaparición, a criterio de varios geólogos, fue origen natural, hipótesis del presente informe; también se planteó la hipótesis que fue consecuencia de la operación de la represa que desvía las aguas hacia la casa de máquinas de la Central Hidroeléctrica Coca Codo Sinclair atribuyendo al proceso asociado a las “aguas hambrientas” o “aguas blancas”.

Varios factores naturales hacen de la zona especialmente susceptible a eventos naturales, tales como la presencia de un volcán activo -El Reventador-, el sistema de fallas conocido como Chingual-Cosanga-Pallatanga-Puná (asociado con el sismo de magnitud 6,9 de marzo de 1987), proceso erosivos y alta pluviosidad, hacen que el área esté expuesta a amenaza ante eventos que ponen en riegos las obras de infraestructura o de asentamientos humanos.

El Alto Coca, donde se localizaba la cascada, forma parte de la historia del Ecuador. Fue la ruta escogida por Gonzalo Pizarro en su incursión a la región amazónica y el posterior “descubrimiento”, en 1542, por parte de Francisco de Orellana, del Marañón o río de las Amazonas. Región en la que estaban asentados los indígenas Quijos, visitada por los Cofanes y Pimampiro. La cascada formaba parte del Parque Nacional Cayambe Coca, era reconocida por los ancestros cofanes como una cascada sagrada

Con el transcurso de los años, esta región se ha constituido en la puerta de acceso a la amazonia norte de Ecuador mediante la E45, así como la ruta por la que atraviesan los oleoductos SOTE y OCP, así como el poliducto Quito - Shushufindi; desde mediados de los cincuenta del siglo pasado, ha sido estudiada por las condiciones hidrológicas y topográfica del río Coca en esta área (en pocos Km tiene un desnivel topográfico de más de 600m) con el objeto de instalar allí una central hidroeléctrica. Finalmente, el proyecto Coca Codo Sinclair, cuya construcción se inició en julio de 2010 y fue inaugurada el 18 de noviembre de 2016, tiene la capacidad de generar 1.500 megavatios, equivalente al 35 % de la electricidad que se genera en el país.

La formación de cascadas por emplazamiento de flujos de lava es frecuente; muchas de ellas transitorias, mientras que otras, dependiendo de la consistencia de los materiales, pueden ser temporales o permanecer por varias centenas de miles de años. A nivel mundial se han descrito pocos ejemplos y modelos conceptuales relativos a los procesos de colapso de diques formados por flujos de lava. Se señala que, en las presas naturales, los mecanismos de colapso suelen producirse por desbordamiento, rotura, canalización y por filtración de las aguas.

En el caso de la desaparición de la cascada de San Rafael, procesos erosivos que afectaron a flujos de lava, debido a la acción hídrica, fueron advertidos por Alberto D. Semanate en 1951, destacó la intensidad erosiva de las aguas del río Pastaza sobre las lavas basálticas localizadas en la garganta de San Martín, cercana a la población de Baños de Agua Santa. Jorge Sevilla, en 1989, expresó que el ejemplo de retroceso de la cascada Agoyán, debe ser tenido en cuenta en los proyectos de aprovechamiento de agua en los que se encuentran inmersas otras cascadas, como es el caso de San Rafael en el río Coca.

Para confirmar la hipótesis que se plantea en el presente trabajo, se realizó un análisis multi-temporal tanto de imágenes satelitales como de fotografías; como también se realizó consultas a expertos que han trabajado en la temática. Se complementó con visita al campo. El análisis de las imágenes permitió observar que desde los primeros meses del 2019 se presentaban unas “señales” en el sitio que evidenciaban una configuración “circular”, la que se fue agrandando hasta que, en setiembre del 2019, se visibilizó como una especie de sumidero y, además, a través de él, actuando como chimenea, succionaba el agua vaporizada que se producía en la base de la cascada debido a la caída del agua y su golpeteo contra las rocas. El análisis histórico (1945 - 2019) de las fotografías de la cascada muestran los cambios morfológicos que se suscitaron en esa singularidad natural, siendo el más evidente el que aconteció entre el 2014 y el 2015, período en el que desapareció el segundo salto hasta esa fecha conocido. Lo anterior se complementa con la revisión de la estructura geológica en la que se asentaba el flujo de lava y la acción de las aguas subterráneas que provocaron la erosión y la construcción de la cueva que estaba al pie, en la margen izquierda, de la cascada.

La desaparición de la cascada ocasionó severos impactos, tanto en la infraestructura como en el ambiente y en el entorno socio económico. Los efectos en la infraestructura involucraron la rotura de los ductos de transporte de hidrocarburos (SOTE, OCP y poliducto), el colapso de la E45 que enlaza la sierra centro -norte con la provincia de Sucumbíos, la central hidroeléctrica Coca Codo Sinclair la represa de toma de agua, así como potencialmente la casa de máquinas. Consecuencia de la rotura de los ductos de hidrocarburos, se produjo dos derrames que provocaron severas afectaciones a las comunidades asentadas aguas abajo del río Coca – Napo, así como a la biodiversidad.

La erosión regresiva del río Coca generó varias afectaciones aguas arriba como erosión del suelo, ruptura de oleoductos, represamientos, deslizamientos, contaminación, pérdida de infraestructuras y una incertidumbre con el futuro de la hidroeléctrica Coca Codo Sinclair. Sin

embargo, aguas abajo también presentaron varios eventos que afectaron a los poblados y comunidades cercanas a las riberas del río, entre ellas se evidenció acumulación de sedimentos, inundaciones, erosión del suelo, pérdida de infraestructuras y zonas de cultivo, a lo que se suma la contaminación por los derrames petroleros que limitó el acceso al agua para consumo humano así como afectaciones a la salud, pesca y biodiversidad tanto del Coca como el Napo. Los sedimentos transportados están entre los 115 y 155M de metros cúbicos de ellos, en el segmento del río entre la que fue la cascada y el Paso Histórico, estaría depositado entre 55 y 65M m³; entre el Paso y el inicio de la planicie amazónica estarían depositados entre 35 y 45M de m³.

El proceso erosivo ha puesto en riesgo asentamientos humanos como el de San Luis (Chaco), Toyuca (Orellana), cómo por el arrastre de sedimentos ha incidido en el curso del río Coca y Napo, afectando los cauces, contribuyendo a que se produzcan inundaciones, acelerando la erosión de las orillas, afectando la pesca, las fuentes de agua, así como la navegación. Los impactos económicos de este proceso se estiman en cientos de millones de dólares, que los que no están contabilizados recursos que se requerirían para construir una nueva represa que suministre agua al PHCCS en caso de que la erosión, actualmente “detenida” afecte a la represa que está en operación, también la carga de sedimentos está poniendo en riesgo la casa de máquinas ya que la cota del río ha subido por los depósitos que se ha producido en el lecho del río en ese sector.

Por efecto de la carga de sedimentos que transporta el río Coca, se han registrado problemas en barrios y comunidades que residen en su entorno. La carga de sedimentos que transporta el río está colmatando el lecho del río, el nivel fluvial va subiendo y la cota de agua, en varios lugares, ha superado los niveles históricos, y con ello se está provocando erosión e inundaciones (ej. Minas de Huataroco – Toyuca). Se han perdido terrenos, sembríos y viviendas, así como a impactado en la actividad pesquera. En el caso de San Luis, la velocidad del proceso erosivo está afectando severamente a este sector, según estimaciones en los próximos 5 años esta población pudiese desaparecer.

El comportamiento del río Coca y el Napo (en la zona de confluencia de los dos) históricamente ha variado. Un análisis de imágenes Google Earth muestran el comportamiento histórico del río que ha afectado tanto la margen derecha como la izquierda. El comportamiento que se espera para los próximos años es que el río Coca, en el sector de la ciudad del Coca, provoque una mayor erosión; en contraste, en la margen izquierda se irá incrementado la superficie debido al incremento de sedimentación. En el río Napo, la erosión en la margen izquierda, en el sector de Amarun Mesa se acentuará; mientras que en la margen derecha las riberas del resiente militar se verán afectadas por un mayor proceso erosivo.

Como síntesis de todo el proceso y las decisiones que sobre la marcha han debido tomar las entidades nacionales, el colapso de la cascada San Rafael en el 2020 tomó por sorpresa a entidades del gobierno ecuatoriano. Las entidades responsables (Petroecuador, CELEC, MTOP, SGR, así como la empresa OCP), no dimensionaron la magnitud de las consecuencias que la erosión ocasionaría. El proceso erosivo, desde el momento que se conoció la desaparición de la cascada, fue rápido provocando severos impactos en obras de infraestructura, el comercio, turismo, centros poblados. La reacción de las instituciones frente al problema fue tardía y reactiva. Evidenció la limitada capacidad para establecer estrategias de mediano y largo plazo para enfrentar el problema. Las instituciones se tomaron demasiado tiempo -meses- para entender la gravedad del problema.

A pesar de las alertas de parte de expertos, las autoridades competentes se concentraron en implementar medidas de protección que resultaron coyunturales como construir variantes

que aseguren el flujo de petróleo, resolver el problema vial, impulsar iniciativas, fallidas, para ralentizar la erosión regresiva, atender los problemas derivados de la contaminación debido a los derrames, previsibles, de petróleo; o buscar respuesta a las comunidades afectadas directamente por la erosión como es el caso del poblado de San Luis.

A consecuencia de a la rotura los dos oleoductos y poliducto, el 29 de abril de 2020, el que pudo haber sido evitado de haber existido un apropiado monitoreo del proceso erosivo por parte de las entidades responsables, la Federación de Comunas Unión de Nativos de la Amazonía Ecuatoriana (FCUNAE), la Confederación de Nacionalidades Indígenas de la Amazonía Ecuatoriana (CONFENIAE), Obispos de los Vicariatos de Orellana y Sucumbíos y varias personas afectadas presentaron una acción de protección con medidas cautelares a favor de aproximadamente 135 mil personas afectadas por el derrame de crudo. 35 mil personas de las provincias de Sucumbíos y Orellana y otras 100 mil que viven en las orillas del Río Coca y Napo, habrían sido afectada según dicha organización.



2 INTRODUCCIÓN

El 7 de Diciembre de 2021, el Wildlife Conservation Society, Programa Ecuador, lanzó una convocatoria para hacer un diagnóstico del estado de vulnerabilidad de tres comunidades ribereñas de los ríos Coca y Napo frente a la erosión regresiva en la parte alta del río Coca. La Corporación Grupo Randi Randi (CGRR), respondió a la convocatoria con una propuesta técnica y financiera que fue aceptada por WCS a finales de Diciembre. El tiempo estipulado para hacer el diagnóstico fue de tres meses, con un tiempo adicional para perfeccionar los informes finales.

Wildlife Conservation Society Programa Ecuador (WCS) es una organización internacional de carácter privado, sin fines de lucro, cuyo objetivo principal es la preservación de vida y paisajes silvestres. En el Ecuador, el enfoque principal de WCS es conservar la biodiversidad a nivel de los paisajes ecológicamente representativos, a través de la investigación aplicada para guiar a la conservación e impulsar alianzas con comunidades locales y otros actores clave para promover actividades y políticas tendientes a la conservación y al desarrollo ecológicamente sostenible.

WCS trabaja desde hace más de 20 años en la zona norte de la Amazonía ecuatoriana, en el denominado Paisaje Llanganates Yasuní, en las cuencas de los ríos Napo y Pastaza. Durante este tiempo WCS ha impulsado el fortalecimiento de la gestión territorial con comunidades locales en el río Napo y en la reducción de amenazas humanas. Desde febrero del 2020, cuando inició el proceso de erosión regresiva del río Coca, debido al colapso de la cascada emblemática de San Rafael, acontecido el 2 de febrero de ese año, WCS ha realizado el seguimiento a este fenómeno y sus posibles impactos sobre las comunidades locales y especialmente sobre sus medios de vida.

Por tal razón, WCS contrató a la Corporación Grupo Randi Randi (CGRR) para realizar un levantamiento de información en algunas comunidades ribereñas de los ríos Coca y Napo, específicamente para conocer: 1) las afectaciones que la erosión regresiva ha provocado en estas comunidades, 2) las herramientas de gestión de riesgos (ej. planes de emergencia) implementados en estas comunidades, 3) las percepciones que tienen las comunidades sobre los riesgos asociados a la erosión regresiva del río Coca y, finalmente 4) las recomendaciones principales para reducir la vulnerabilidad de las comunidades frente a eventos asociados a la erosión regresiva (ej. derrames petroleros).

CGRR es una organización ecuatoriana, privada, sin fines de lucro, legalizada por el Ministerio de Agricultura (MAG) en 2000. Su misión es ejecutar proyectos de conservación y desarrollo sustentable con enfoque de género a través de financiamientos nacional e internacional, estableciendo alianzas estratégicas para facilitar procesos y acciones de investigación y asistencia técnica, con comunidades y organizaciones locales principalmente, en sitios críticos para el manejo de recursos naturales. Es actualmente conformada por nueve socias y socios (la mayoría mujeres) representando las ciencias sociales, ambientales, geográficas y agrícolas. Desde su creación, CGRR ha trabajado en el fortalecimiento de la gestión de varias áreas protegidas, el manejo participativo de cuencas hidrográficas, los procesos de gobernanza ambiental y la investigación en ecología de ecosistemas de montaña, cambio climático y género. Es importante mencionar que la inclusión del enfoque de género en todo su trabajo es parte de la política institucional de CGRR.

La experiencia general de CGRR relevante al tema de la consultoría se centra en la facilitación de planes de manejo de áreas protegidas (AP) en Ecuador, la facilitación y fortalecimiento de comités de gestión para las AP, el manejo participativo de fuentes de agua y humedales, y la restauración de ecosistemas alto andinos. CGRR ha hecho varios estudios sobre las percepciones locales sobre cambio climático, vulnerabilidad y riesgos naturales. Uno de los

estudios fue sobre dichas percepciones en zonas fronterizas de cuatro países andinos: Ecuador, Colombia, Perú y Bolivia. Utilizando una metodología que combinaba una encuesta formal, entrevistas informales a informantes claves y grupos focales para el mapeo participativo de riesgos y vulnerabilidades, el estudio levantó información sobre las medidas que las familias locales están incorporando en sus prácticas productivas o de conservación para compensar o mitigar los cambios percibidos. Esta experiencia ha sido aplicada en la elaboración del presente diagnóstico para WCS.

Basado en los términos de referencia de WCS para el diagnóstico, la CGRR definió cuatro objetivos para la presente consultoría.

1. Elaborar una síntesis analítica de la historia geológica/ambiental del río Coca, los orígenes de la actual situación de erosión regresiva, la infraestructura construida en su curso para la generación de electricidad y la conducción de petróleo, y los riesgos actuales y futuros para las poblaciones ribereñas tanto rurales como urbanas.
2. Hacer un inventario analítico de los planes de desarrollo territoriales recientes de la zona del diagnóstico (partes de las provincias de Napo y Orellana) a nivel provincial, cantonal y parroquial, junto con otros planes o herramientas de gestión de los riesgos disponibles (ej. Secretaría Nacional de Gestión de Riesgos, planes de emergencia, etc.) El inventario indicará los problemas y soluciones o medidas planteadas frente a riesgos en cada plan y las acciones tomadas para la implementación hasta la fecha del diagnóstico.
3. Analizar las percepciones de las personas (hombres y mujeres) de las comunidades ribereñas sobre los riesgos asociados con la erosión regresiva del río Coca.
4. Recomendar a agencias y autoridades responsables los pasos, procesos y políticas para reducir la vulnerabilidad de las comunidades frente a eventos asociados a la erosión regresiva (ej. material erosivo, sedimentación del río, derrames petroleros causados por derrumbos en el río).

Los productos de la consultoría son cinco:

1. Síntesis analítica de la historia, actualidad y futuro del río Coca
2. Inventario analítico de los planes de desarrollo territorial y planes de emergencia de la zona del diagnóstico
3. Análisis de las percepciones locales sobre la erosión regresiva del río Coca
4. Lecciones aprendidas (conclusiones)
5. Recomendaciones a agencias y autoridades responsables

Para cada objetivo y producto, la CGRR elaboró una metodología apropiada acorde con el tiempo disponible y el presupuesto para efectuar el diagnóstico, de modo que se adaptara a las diversas dificultades actuales de la zona, especialmente en cuanto a la limitación para el acceso y la logística debido al cierre de ciertas vías. A ello se suman las restricciones y condiciones impuestas en el marco de la pandemia Covid19. El detalle de esta metodología fue presentado en la propuesta para la consultoría. Luego, la metodología fue adecuado sobre la marcha del diagnóstico. La metodología final aplicada está detallada en el informe final de cada producto.

La consultoría arrancó a fines de enero de 2022 y el equipo CGRR presentó un informe preliminar al final de Febrero 2022 que cubrió la primera fase del diagnóstico, que centró en una panorámica de la situación actual del río Coca, tanto arriba de la cascada colapsada, como río abajo hasta la ciudad de Coca e incluyó un tramo del río Napo entre la bocana del río Coca y el recinto Pompeya. En el mapa a continuación, se puede apreciar los sitios visitados durante la

en los resultados, seleccionamos 3 comunidades para efectuar talleres con grupos focales usando el mapeo participativo y la exploración de riesgos, vulnerabilidad y efectos de la erosión regresiva en la vida de las comunidades.

En cada informe se incluye conclusiones, lecciones aprendidas y recomendaciones a agencias y autoridades responsables.

El presente informe (1), hace relación con el contexto geológico del sitio de la erosión, analiza el proceso erosivo sus origen -aquí se contrasta las hipótesis de origen antrópico u origen natural- y las consecuencias del proceso en lo ambiental, en lo social y económico. Se analiza las implicaciones de la erosión aguas arriba de lo que fue la cascada, así como los efectos aguas abajo debido al arrastre de sedimentos. También se hace un recuento de los derrames de hidrocarburos y las afectaciones aguas abajo en los ríos Coca y Napo en las comunidades asentadas en su entorno – acceso a agua para consumo humano, afectaciones a la salud-, así como a la biodiversidad. Se hace referencia a las acciones emprendidas por las instituciones del Esta Ecuatoriano (Petroecuador, SNGR, CELEC y MTOP principalmente); así como las que emprendió la empresa OCP. En el contexto de este informe, se hace un recuento fotográfico del proceso de transformación morfológica de la cascada de San Rafael (Anexo 1), así como se presenta una síntesis histórica de cómo se “descubrió” la cascada.

En cada informe se incluyen conclusiones, lecciones aprendidas y recomendaciones a agencias y autoridades responsables. El presente informe (3) corresponde al análisis de la desaparición de la cascada, sus consecuencias y las acciones para mitigar sus impactos por lo tanto las conclusiones tienen ese enfoque.

3 METODOLOGÍA EMPLEADA

Para la preparación del presente informe se realizaron entrevistas a profesionales, técnicos, ciudadanos, sí como se realizó una amplia revisión de documentos técnicos y científicos, así como publicaciones de prensa. Parte importante fueron documentos oficiales, así como pronunciamientos de autoridades y funcionarios facultados para hacerlo.

Se accedió a las páginas web de los diferentes entidades de gobierno relacionados con la temática, de los GADs, cuando esta información no se encontraba disponible por estos medios se hizo la solicitud al GAD directamente para su obtención. Para el análisis del proceso erosivo se realizó una revisión multi-temporal de imágenes satelitales: Sentinel y Planet. Durante las visitas de campo se realizaron reuniones con autoridades locales (Municipio de el Chaco, y del Coca), así como con representantes de las comunidades afectadas. La recuperación de fotografías históricas se la logró accediendo las publicadas en documentos técnicos, en sitios web, así como de los archivos de ciudadanos que habían tomado fotografías de la cascada en años anteriores y que, muy gentilmente, las compartieron (al pie da cada foto están los créditos que corresponden).

4 ANTECEDENTES

El 2 de febrero del 2020, la emblemática cascada de San Rafael desapareció. Las aguas que de este atractivo salto natural comenzaron a fluir por debajo de un arco que se formó hacia la base de la cascada, consecuencia de un proceso erosivo que fue erosionando las rocas en las que se asentaba el flujo de lava que represó el curso del río Coca entre 8000 y 12 000 años¹. La prensa nacional se hizo eco de este singular acontecimiento, a la vez que algunos profesionales alertaron sobre las consecuencias de este evento tanto para la infraestructura situada aguas arriba como para los centros poblados tanto de aguas arriba de la cascada como los situados aguas abajo. Se alertó sobre el impacto que tendría para la economía nacional.

La cascada de San Rafael estuvo ubicada, en la vertiente oriental de la Cordillera Real, en los límites de las provincias de Napo y Sucumbíos, en la zona de transición entre la cordillera Andina y la Amazonía del Ecuador, en el Parque Nacional Cayambe Coca; tenía una altura aproximada de 140 metros y unos 60 metros de ancho. El flujo de lava que dio origen a ese singular rasgo geo-morfológico provino del volcán Reventador. Esta cascada constituía un importante y emblemático atractivo turístico, no solo de la zona, sino también del país.

El área en la que se localizaba la cascada, geológicamente constituye una zona en la que están presentes edificios volcánicos cuaternarios, rocas de edad cretácica (Fm Tena, Fm Napo, Fm Hollín) / jurásica (Fm Misahuallí) así como cuerpos intrusivos grano dioríticos (cenozoico); la zona está situada en una región sísmicamente activa. El rasgo geológico más distintivo lo configura el edificio volcánico El Reventador que tiene una elevación de 3.480 msnm; e hidrológicamente convergen, entre otros, los ríos Quijos y Salado para formar el río Coca que finalmente drena en el río Napo.

Este territorio forma parte de la vertiente amazónica de la Cordillera de los Andes, al norte de la región oriental del Ecuador. En términos hidrográficos, corresponde al curso medio de la cuenca hidrográfica del río Coca (CHRC), cuyo nacimiento se encuentra en alturas del orden de 5 000 m.s.n.m. (v. Antisana, v. Cayambe). La CHRC está ubicada en un área de transición entre los Andes y la Amazonía y cubre un área de 5283 Km². El régimen climático se caracteriza por ser cálido húmedo en la zona media baja y frío seco en las partes altas de las montañas. La precipitación media anual es de 2950 mm, el período de mayor pluviosidad se registra entre mayo y julio. Se ha llegado a registrar hasta 6000 mm de lluvia al año en la estación de Reventador². La cuenca del Coca incluye páramos, bosques andinos, bosques húmedos tropicales y humedales todos ellos con una importante biodiversidad; en esta cuenca se localizan varios poblados como Papallacta, Baeza, Cosanga, El Chaco, Borja, El Reventador, entre otros.

El área tiene una topografía accidentada consecuencia de la convergencia de tres factores: i) el levantamiento del basamento cristalino -afloran formaciones metamórficas que integran el basamento, sedimentos jurásicos y cretácicos, intrusivos graníticos y granodioríticos -, ii) la actividad volcánica de El Reventador (extensos flujos de lava, uno de ellos formó la cascada de San Rafael; depósitos de cenizas, avalanchas de escombros, lahares), y iii) los procesos erosivos debido a la acción fluvial.

La confluencia de varios factores naturales como la presencia de un volcán activo -El Reventador-, la presencia de un sistema de fallas conocido como Chingual-Cosanga-Pallatanga-

¹ Existen opiniones (B. Beate com. per.) que señalan que el flujo podría haberse generado hace menos de 5000 años.

² Investigación Muestra Erosión en Cauce del Río Coca en el Sector de San Rafael. Escuela Politécnica Nacional. <https://www.epn.edu.ec/investigacion-muestra-erosion-en-cauce-del-rio-coca-en-el-sector-de-san-rafael/>

Puná (asociado con el sismo de magnitud 6,9 de marzo de 1987³), los procesos erosivos, alta pluviosidad, por la presencia de obras de infraestructura o de asentamientos humanos, hacen que el área esté expuesta a amenazas⁴ ante eventos naturales tales como terremotos, deslizamientos en masa, erupciones volcánicas que pueden ocasionar severos desastres⁵. En la zona es necesario tener presente acciones antrópicas como el mal manejo del suelo, pérdida de cobertura vegetal, contaminación ambiental (derrames de hidrocarburos, disposición de desechos sólidos y líquidos, ampliación de frontera agropecuaria, urbanización, etc.) que afecta las cuencas, los recursos hídricos y la calidad de vida de los ciudadanos que se asienta en su entorno.

La desaparición de la cascada fue un evento ampliamente difundido por la prensa nacional e internacional, así como también comentado por organizaciones y profesionales interesados en el tema. Se debatió sobre el origen de la desaparición -antrópico o natural-, así como sobre las consecuencias de este proceso en obras de infraestructura y de asentamientos humanos. El proceso de desaparición, a criterio de varios geólogos, fue origen natural que se inició desde el mismo momento en el que se activó la cascada (entre 12000 y 8000 años); se planteó, además, la hipótesis de que es consecuencia de la operación de la represa que desvía las aguas hacia la casa de máquinas de la Central Hidroeléctrica Coca Codo Sinclair⁶, la misma que está situada a unos 20 km aguas arriba de lo que fue la cascada, a la que se le atribuye que por la retención de sedimentos se ocasionaba una aceleración de la erosión en el lecho del río debido al proceso asociado a las “aguas hambrientas”⁷ o “aguas blancas”.

³ Narváez Changuan E.J. 2015. Daños que se Presentan en Edificaciones de Hormigón Armado Después de un Evento Sísmico. (Terremoto de Bahía de Caráquez). Aislación Sísmica con Aisladores Elastoméricos con Núcleo de Plomo. Universidad Internacional del Ecuador Facultad de Ingeniería Civil Trabajo de Titulación Previa a la Obtención del Título de Ingeniero Civil. Quito, julio del 2015.

⁴ Amenaza natural definida como: “Procesos o fenómenos naturales que pueden ocasionar la muerte, lesiones u otros impactos a la salud, al igual que daños a la propiedad, la pérdida de medios de sustento y de servicios, trastornos sociales y económicos, o daños ambientales..” Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres de las Naciones Unidas – UNDRR-.

⁵ Desastre definido como “una seria interrupción en el funcionamiento de una comunidad o sociedad que ocasiona una gran cantidad de muertes al igual que pérdidas e impactos materiales, económicos y ambientales que exceden la capacidad de la comunidad o la sociedad afectada para hacer frente a la situación mediante el uso de sus propios recursos” (UNDRR).

⁶ Investigación Muestra Erosión en Cauce del Río Coca en el Sector de San Rafael. Escuela Politécnica Nacional. <https://www.epn.edu.ec/investigacion-muestra-erosion-en-cauce-del-rio-coca-en-el-sector-de-san-rafael/> Comunicación del Grupo de Discusión – Hidrología Ecuador, del 8 de septiembre de 2020, dirigido al Presidente de la República, Lenin Moreno, y otras autoridades.

⁷ El fenómeno denominado de “aguas hambrientas” (hungry waters), es debido a que las aguas que salen de un embalse no tienen carga de sedimentos, y pueden arrastrar con mucha más energía y efectividad los sedimentos del lecho de ríos aguas debajo de obras de retención (Kondolf, 1997; Schmidt y Wilcock, 2009). Uno de los principales efectos sobre la morfología del río es la erosión vertical del lecho, que se denomina incisión del río (Arnaud et al., 2012). En: Mao L. 2016. Sedimentos, Hidráulica y Efectos Morfológicos. Mesa de Hidroelectricidad Sustentable. Secretaría Técnica Ministerio de Energía | Chile

5 EL ALTO COCA

5.1 Ubicación geográfica

El proceso erosivo, consecuencia de la desaparición de la Cascada de San Rafael, se inició en el límite provincial Napo/Sucumbíos, en la parroquia de Gonzalo Díaz de Pineda, cantón El Chaco, provincia de Napo, cuenca alta del río Coca. Por esta zona atraviesa el eje vial estatal E45 que corresponde al tramo Quito-Lago Agrio mediante la que se tiene acceso a diversas poblaciones como “El Reventador, Lumbaqui, Cascales, Lago Agrio, entre otras. La región norte amazónica ecuatoriana, principal productora de petróleo, cuenta con la presencia de importantes áreas protegidas (Cuyabeno, PN Cayambe Coca, PN Gran Sumaco).

5.2 Aspectos físico naturales

5.2.1 Hidrografía

La Cuenca Hidrográfica del Río Coca (CHRC) está integrada por las subcuencas de los ríos Quijos⁸ (2.788 Km²) y Salado⁹ (953 Km²) los que, a partir de su confluencia, forman el Río Coca. Las dos subcuencas (Quijos y Salado), tienen sus nacimientos en la cordillera central, y constituyen la principal fuente de abastecimiento de agua para el proyecto Hidroeléctrico Coca Codo Sinclair. El punto más alto de la CHRC está a 5.759 msnm en el volcán Cayambe, mientras que el más bajo está a 640 msnm en el Río Coca en la planicie amazónica. Dos singularidades hidro-geográficas caracterizan a la cuenca: la cascada de San Rafael (desaparecida) y la cascada del Río Malo.

El área de drenaje de la cuenca aguas arriba de la obra de captación (represa para el Proyecto Hidroeléctrico Coca Codo Sinclair - PHCCS) es de aproximadamente 3.742 Km² y, si se amplía a la obra de descarga (casa de máquinas) el área es de aproximadamente 4.080 Km². La cuenca Hidrográfica del Río Coca, que forma parte de la cuenca del río Napo, en su totalidad cubre un área de 5.547 Km².

El 77% del área de la CHRC pertenece al Sistema Nacional de Áreas Protegidas (SNAP), así como a un conjunto de Bosques Protectores, así, el 43% situado en el Noroeste del área está en el Parque Nacional Cayambe Coca; el 13% ubicado en el Sur Oeste se encuentra dentro de Parque Nacional Antisana; un 11%, en el borde Sureste del área, pertenece al Parque Nacional Sumaco Napo Galeras; mientras que el Bosque Protector La Cascada y el Bosque Protector de la Parte Media y Alta del Río Tigre se encuentran en su totalidad dentro del área, ocupando un 4% de la superficie de la misma cada uno, al igual que el Bosque Protector Comanda que representa un 2% de la superficie.

En la CHRC se localizan los siguiente cantones: El Chaco, Gonzalo Pizarro y Quijos, cuyas cabeceras cantonales son El Chaco, Dorado de Cascales y Baeza, respectivamente; entre poblados de importancia que se encuentran en la cuenca están: San Luis, Bombón (Gonzalo Díaz de Pineda), Papallacta, Borja, Santa Rosa y Cosanga.

5.2.2 Clima

El régimen climático predominante en el área es el cálido húmedo con lluvias medias que

⁸ La Sub Cuenca del Río Quijos incluye las sub cuencas de los ríos: Borja, Cosanga, Murallas, Oyacachi y Papallacta:

⁹ La Sub Cuenca del Río Salado incluye las sub cuencas de los ríos: Azuela y Clavadero

van de 3.500 a 6.000 mm/año. Las temperaturas oscilan entre 34°C como máxima y 11°C como mínima. La evaporación presenta una media de 1.000 mm/año. La humedad es siempre alta, con valores de alrededor del 90%.

La precipitación promedio en la Subcuenca del Quijos es de 2 225 mm mientras que en la del Salado es de 2 106 mm.¹⁰ Esta subcuenca recibe una mayor precipitación al año que la subcuenca del río Salado. Las precipitaciones durante todo el año, en las subcuencas, se sitúan por encima de 160 mm por mes. Los meses con menor pluviosidad corresponden a Agosto, Septiembre, Octubre, Noviembre y Diciembre; mientras que los meses con mayor presencia de lluvia son abril, mayo, junio y julio. En los otros meses del año el clima es muy variante.

5.2.3 Geomorfología

La Cuenca Hidrográfica del Río Coca (CHRC) se localiza en un área de transición entre los Andes y la Amazonía, caracterizada por un régimen climático cálido húmedo en la zona media baja y clima frío seco en las partes altas de las montañas. Corresponde a una zona de transición que va desde la parte Nororiental del sistema montañoso de los Andes (Cordillera Real) hasta los terrenos de la baja pendiente en la región Amazónica o Zona Subandina.

Grupo	Sistema	Formación	Perfil Estratigráfico	Espesor (m)	Descripción Litológica
Cenozoico Zc	Cuaternario Q		0 Vr		Depósitos aluviales modernos y terrazas. Rocas volcánicas, lavas y piroclastos.
Mesozoico (Mz)	Cretácico (K)	Tena	kt	400-600	Areniscas limosas rojizas, verdosas a grises Arcillas rojas abigarradas Areniscas en la parte basal de la Tena
		Napo Superior	kn _s	250-400	Lutitas y limolitas negras con improntas de fósiles Calizas arenosas diaclasadas
		Napo Medio	kn _m		Calcarentismuy finas y calcilitas fosilíferas. Lutitas y limolitas negras
		Napo Inferior	kn _i		Areniscas calcáreas bioturbadas con esferulitas y glauconitas. En la parte basal encontramos Lutitas negras.
	Hollín	kh	80-150	Areniscas cuarzosas blancas con intercalaciones de lutitas negras y laminadas.	
Paleozoico (Pz)	Jurásico (J)	Misahuallí	km	>600	Rocas volcánicas porfíricas, lavas andesíticas-basálticas, brechas, ignimbritas soldadas, tobas andesíticas silicificadas. Presente el intrusivo de Cascabel
	Zámbrico (Zm)	Metamórfico	u	>1500	Rocas metamórfica, esquistos y gneises. Presente el intrusivo de Cascabel

Ilustración 1: Columna Estratigráfica donde se emplaza el PHCCS. Fuente: César Vásquez, 2011. Tomado de: EsIA Expost y PMA para Explotación de Materiales de Construcción Área de Préstamo Coca Codo XI.

En la zona Subandina están presentes dos volcanes que son el Sumaco con 3900 msnm y el Reventador con 3785 msnm, este último se encuentra en actividad relativamente continua desde el 2002 con presencia de flujos de lava y piroclásticos, misiones de ceniza y otros productos asociados como lahares.

5.2.4 Geología¹¹

El área en la que está localizado el proceso erosivo forman parte de la Zona Subandina Oriental Ecuatoriana que se encuentra constituida por una potente serie de rocas sedimentarias marino – continentales. En el Mesozoico Superior las rocas de origen continental de la Formación Misahuallí, luego de un importante intervalo de tiempo sin aportes sedimentarios, en el cretácico fueron cubiertas por una transgresión marina durante la cual se depositaron los

¹⁰ Efficácitas. 2008. Estudio de Impacto Ambiental Definitivo Proyecto Hidroeléctrico COCA CODO SINCLAIR. RESUMEN EJECUTIVO. COCASINCLAIR S.A. Eficiencia Energética y Ambiental Efficácitas Consultora Cía. Ltda. Guayaquil, Ecuador Mayo, 2009

¹¹ Referencias: 1) ENTRIX. 2014. Estudio de Impacto Ambiental Expost y Plan de Manejo Ambiental para la Explotación de Materiales de Construcción en el Área de Préstamo: Coca Codo XI. Hidroeléctrica Coca Codo Sinclair EP. Número de Proyecto 12148020 Director de Proyecto Ing. Miguel Alemán Msc. Fecha Junio, 2014.

sedimentos de las formaciones Hollín, Napo y Tena sobre una amplia cuenca Pericratónica.

Jurásico-Cretácico Inferior

- Formación Misahuallí. JKm (Triásico)

Aflora en la parte inferior y a lo largo del cañón del río Coca, conforma el basamento litológico del sector. Unidad de origen continental, comprende una secuencia de rocas volcánicas tales como basaltos verdes a grises, traquitas, tobas y brechas tobáceas, con arenas rojas; areniscas feldespáticas, tufitas y brechas. La edad de la Unidad Misahuallí es probablemente Cretácico Inferior, en el límite con el Jurásico – Cretácico. La potencia de la formación Misahuallí, en la zona, tiene unos 200 m; si bien su potencia total no ha sido aún establecida, esta podría ser superior a los 600 m.

Cretácico

- Formación Hollín - Kh (Cretácico Inferior: Albiense-Aptiano)

Presente a lo largo del cañón del río Coca. Generalmente en bancos macizos de arenisca cuarzosa de color blanco, cuyo tamaño de grano varía de grueso a fino, en algunos lugares tienen estratificación cruzada y con frecuencia presentan impregnación de asfalto; están presente intercalaciones delgadas de lutitas de color oscuro, en la parte superior presenta lutitas carbonosas negras. Esta formación constituye uno de los principales reservorios petroleros localizados en la región amazónica ecuatoriana. El espesor de la formación se estima en 200 metros; sin embargo, en el área se encuentran depósitos de 90 a 100 m de potencia.

- Formación Napo - Kn (Cretácico: Albiano Inferior-Cenoniano)

Formación de ambiente marino que consiste de una secuencia de lutitas intercaladas con areniscas y calizas. Esta formación en base a estratos calcáreos bien definidos se divide en tres: 1) Napo Inferior (edad Albiano Superior y Cenomaniano Inferior) predominan areniscas y lutitas de color gris - verde y gris oscuro o negro, existen calizas pero en menor proporción; 2) Napo Medio (Turoniano Inferior hasta el Superior) consiste de caliza macizas o en capas gruesas, de color gris con fósiles acumulados; y, 3) Napo Superior (Cenomaniano) están presente lutitas compactas de color gris, gris y negro, interestratificadas con poca caliza de color gris oscuro. El espesor de la formación Napo medida en el cañón del río Coca es de aproximadamente 300 m.

Paleoceno

- Formación Tena - KPctd (Cretácico Superior-Paleoceno Inferior)

Formación predominante arcillosa, con colores que varían entre pardo rojo, rojo claro, ladrillo y violeta, la integran dos miembros: 1) Tena Inferior compuesta por limolitas y areniscas rojas continentales de grano fino, que yacen concordantes sobre las areniscas y limonitas de "Tena Basal" que fueron depositados en un delta de marea. 2) Tena Superior consiste de un paquete de limonitas y areniscas de grano más grueso que Tena Inferior, depositados en un medio continental de abanico aluvial distal. Por la escases de fósiles no se ha logrado una datación exacta, y se la asignado una edad Cretácico Superior (Maestrinchense) al Paleoceno. No está presente en el área de influencia del proceso erosivo, se la puede observar en ciertos lugares de la CHRC con potencias que no superan los 50m.

Pleistoceno

- **Depósitos Asociados al Complejo Volcánico El Reventador Qde2¹²**

Material volcánico de este período se debe a la existencia del complejo volcánico Reventador que, a lo largo de su historia, ha presentado actividades eruptivas, así como el colapso de los edificios volcánicos como el Complejo Volcánico Basal (Reventador 1) y Paleovolcán Reventador (Reventador 2). El Reventador 1 formado por ignimbritas, lavas y brechas permanece en parte como un primer depósito de escombros-avalancha conocido como Avalancha 1 (AVL1). El Reventador 2, dominado por una intercalación de lavas y depósitos piroclásticos, y que sufrió un gran colapso sectorial es responsable de un segundo depósito de avalancha de escombros AVL2, cuyos materiales están expuestos en todo el valle del río Coca en la zona de estudio. El actual edificio del Reventador (Reventador 3) está formado por flujos de bloques de andesita basáltica, brechas y lahares.¹³

Holoceno

- **Depósitos Coluviales - Qc**

Corresponde a depósitos de pendientes o coluviales constituidos por un material heterogéneo como arcillas, limos con presencia de rodados decimétricos. Son de espesor limitado y sin estratificación. Presentes a lo largo de los valles de los ríos Coca, Quijos y Salado. Durante el sismo de marzo de 1987, asociado con las altas precipitaciones que prevalecieron, importantes volúmenes de estos materiales fueron movilizados sobre las laderas del valle de los ríos Salado y Coca, provocando derrumbes y deslizamientos que se acumularon en las partes bajas alterando significativamente la geografía del sector.

- **Conos de Deyección –Dz**

Son conos eventuales y de pequeña magnitud, compuestos por fragmentos angulosos de roca de varios tamaños y una matriz limo arenosa; están restringidos a las partes bajas de las quebradas donde éstas cambian su pendiente al llegar a los valles.

- **Depósitos y Terrazas Aluviales - Qa y Qt**

En el cauce de los ríos Coca, Salado y Quijos se encuentran materiales aluviales, caracterizados por una mezcla de arena, grava y cantos rodados con algo de limo. En algunos sectores predomina la arena formando bancos y en otros las gravas y cantos rodados; las partes más bajas de estos valles constituyen superficies de inundación en las épocas de crecida con la consecuente deposición de una capa delgada de arena. Las terrazas del río Coca se exponen en varios niveles, generalmente separadas por desniveles abruptos y de espesores no mayores a los 10 m. En la cuenca baja del río Coca, estos materiales movilizados desde la cuenca alta y media, forman llanuras aluviales los que, en algunos lugares, estos materiales aluviales son extraídos para la construcción o vialidad.

5.3 Actividad Sísmica

Las zonas sísmicas han sido determinadas en función de los movimientos telúricos ocurridos en el Ecuador continental relacionados a fallas geológicas activas intraplacas que desplazan y levantan la Cordillera de los Andes. El entorno tectónico del Ecuador actual es el

¹² INECEL. 1988. Estudio Vulcanológico de "El Reventador". Ministerio de Energía y Minas – Instituto Ecuatoriano de Electrificación. Quito – Ecuador.

¹³ Reyes P. et. al. 2011. Exceptionally uncommon overburden collapse behind a natural lava dam: Abandonment of the San-Rafael Waterfall in northeastern Ecuador. Journal of South American Earth Sciences 110 (2021) 103353.

resultado de una evolución transpresiva¹⁴ que ha tenido lugar a lo largo del Paleoceno como consecuencia de una subducción oblicua y un crecimiento continental progresivo y acrecional. Consecuencia de la convergencia oblicua y acreción de terrenos oceánicos, un bloque tectónico comenzó a ser empujado hacia el noreste, como respuesta a la ruptura debido a los esfuerzos de cizalla y el acoplamiento a lo largo de la interfaz del norte de Ecuador. Este bloque continental se conoce como el Bloque Andino Norte (BAN) que se extiende desde el Golfo de Guayaquil hasta la costa Norte de Venezuela, una mega y compleja estructura sismogénica con altas tasas de deformación cortical-, el cual migra en dirección NE con respecto a Sudamérica y está limitado al este, en Ecuador, por el sistema de fallas Chingual-Cosanga-Pallatanga-Puná (CCPP) que marca el límite occidental de la placa estable sudamericana; por su longitud, su papel de límite de placas intracontinentales y su velocidad estima (4 y 8 mm/año), este sistema presenta el más elevado potencial sismogénico regional.^{15 16}

El límite oriental del BAN (en Ecuador) incluye cuatro segmentos: Chingual, Cosanga, Pallatanga y Puna a los que se los ha definido como el sistema de fallas CCPP. Este sistema muestra tasas de desplazamiento generales del orden de 7 ± 2 mm (medido con GPS), 7,6 mm anuales (tasa de deslizamiento geológico medio estimado para la parte final del Pleistoceno) o un máximo de $11,9 \pm 0,7$ mm anuales en el segmento más septentrional (a partir de indicadores geológicos).¹⁷

En el sistema de fallas CCPP, el segmento que corresponde a Cosanga tiene una alineación N10°. Las estructuras tectónicas muestran principalmente un comportamiento transpresivo. Su parte norte ha experimentado dos terremotos de $M_w \sim 7$ durante los últimos 60 años (1955 y 1987), mientras que hacia el sur en este sistema han acontecido terremotos de $M_w > 5$ que muestran mecanismos focales transpresivos (p.e. el evento de 6.3 M_w del 22 de septiembre de 1987 (Ambato) y el terremoto del 6 de marzo de 1987 (El Reventador) ($6,1$ y $M_s = 6,9$); los dos muy probablemente en el mismo sistema de fallas.¹⁸

Está presente también el levantamiento del Napo que estructuralmente constituye un gran anticlinal de eje paralelo al rumbo general de la Cordillera de los Andes, con orientación NNE-SSO, limitado al Este y al Oeste por fallas transpresivas¹⁹ o por una faja de cabalgamientos de bajo ángulo y fallas inversas ya reconocidas por Tschopp (1953). Las fallas principales asociadas a esta estructura son: Payamino - Cascales y Puyo.

Los análisis de la sismicidad histórica muestran que, en el área del Alto Coca, sitio en el que está aconteciendo la erosión regresiva, y en la que está presente importante infraestructura vial, oleoductos y eléctricos, así como asentamientos humanos, corresponde a una de las zonas de mayor actividad sísmica del país. La Cordillera Real se encuentra dentro de zonas con peligrosidad sísmica desde baja a alta y presenta curvas de aceleración con rumbo NNE-SSO. Al Norte, zona del proceso erosivo, se define la concentración de aceleraciones dentro del sistema constituido por las fallas Chingual, Reventador, Salado, Baeza-Chaco y Cosanga con peligrosidad sísmica de media a alta y un rumbo predominante NNE SSO. Las características de tendencia de

¹⁴ Proceso de formación de fallas de desplazamiento de rumbo y la compresión, o convergencia, de la corteza terrestre.

¹⁵ Yepez, H., L. Audin, A. Alvarado, C. Beauval, J. Aguilar, Y. Font, and F. Cotton (2016). A new view for the geodynamics of Ecuador: Implication in seismogenic source definition and seismic hazard assessment, *Tectonics*, 35, 1249–1279, doi:10.1002/2015TC003941.

¹⁶ Yépez, H., Bonilla, E., Ruiz, M. (1993) "Seismic Hazard in Ecuador". The Practice of Earthquake Hazard Assessment. R. McGuire Editor. IASPE/ and European Seismological Commission, 92-95.

¹⁷ Idem. Yepez, H., et al (2016).

¹⁸ Idem. Yepez, H., et al (2016).

¹⁹ Baby P., Marco Rivadeneira, Roberto Barragán, Editores Científicos. 2004. La Cuenca Oriente: Geología y Petróleo. IFEA, IRD, Petroecuador. Quito.

las curvas de aceleración, así como de los principales fallamientos y estructuras geológicas determinan que se está produciendo el desplazamiento del bloque Norandino en dirección NNE-SSO a lo largo de los sistemas de fallas principales que conforman esta zona.²⁰

5.4 Actividad Volcánica: Volcán Reventador

El volcán El Reventador, localizado en la parte norte de la zona subandina, en el sector norte del levantamiento Napo, a unos 52 km al norte del volcán Sumaco; se caracteriza por que exhibe un volcanismo calco-alcálido con una cierta signatura adakítica similar a la que presentan los volcanes holocénicos Cayambe y Antisana. Es uno de los volcanes más activos del Ecuador.

El complejo volcánico lo constituye una secuencia de productos efusivos (flujos de lavas extensos), avalanchas de escombros y flujos piroclásticos. Se distinguen tres grandes unidades correspondientes con los edificios volcánicos que representan las principales etapas de evolución del complejo volcánico (INECEL, 1988). Morfológicamente El Reventador está constituido por un estratocono activo holocénico que alcanza una elevación de 3 500 msnm (Hall, 1977), y ubicado en el interior de un gran anfiteatro resultado del colapso volcano-tectónico de al menos dos antiguos centros volcánicos, asociados con los depósitos de avalanchas de escombros que rellenan el cauce del Río Quijos (Coca) (INECEL, 1988). El volcán El Reventador ha tenido al menos 24 episodios eruptivos desde 1541, siendo su actividad eruptiva más reciente en 1972-1973, 1976 y 2002²¹; el evento eruptivo que se inició en el 2002 continúa hasta la presente fecha. En la sección 5.5.1 se describe con más detalle en la historia del descubrimiento de El Reventador.

5.5 Reseña Histórica: El Reventador - El Río Coca - Cascada de San Rafael

El Alto Coca forma parte de la historia del Ecuador. Fue la ruta escogida por Gonzalo Pizarro en su incursión a la región amazónica y el posterior “descubrimiento”, en 1542, por parte de Francisco de Orellana, del Marañón o río de las Amazonas. Región en la que estaban asentados los indígenas Quijos; C. M. Villavicencio (1858)²² señala que los Cofán y Pimampiro visitaban el área del alto Coca (llegaban a la confluencia del Oyacachi con el Río Coca). Con el transcurso de los años, esta región se ha constituido en la puerta de acceso a la amazonia norte de Ecuador mediante la E45, así como la ruta por la que atraviesan los oleoductos SOTE y OCP - toda la producción petrolera exportable de la amazonia se transporta por los dos oleoductos, así como la que se utiliza en la refinería de Esmeraldas-, así como el poliducto Quito - Shushufindi; desde mediados de los cincuenta del siglo pasado, ha sido estudiada por las condiciones hidrológicas y topográfica del río Coca en esta área (en pocos Km tiene un desnivel topográfico de más de 600m) con el objeto de instalar allí, aprovechando de ese desnivel, una central hidroeléctrica, cuya construcción se inició en julio de 2010 y fue inaugurada el 18 de noviembre de 2016, con una capacidad de generación de 1.500 megavatios, equivalente al 35 % de la electricidad que se genera en el país.

5.5.1 El Reventador

“Un día de marzo de 1926, la población de Quito despertó alarmada por estruendos

²⁰ FUNESPA. 2011. Apoyo Al Sistema de Gestión De Riesgo Natural en la Provincia de Pichincha “Estudio y Análisis de Amenazas, Vulnerabilidades e Identificación de Riesgos y Posibles Medidas de Prevención y Mitigación en la Provincia de Pichincha. Informe Técnico Final. Convenio de Cooperación Técnica No Reembolsable Ec-T1124 ATN/OC-11386-EC entre el Banco Interamericano de Desarrollo y el Gobierno de la Provincia de Pichincha. Agosto – 2011. Quito, Ecuador

²¹ Idem: Baby P., et. al. 2004.

²² Villavicencio M. 1858. Geografía de la República del Ecuador. Primera Edición: Imprenta de Robert Craigmend - New York. Segunda edición: Corporación Editora Nacional – Quito. 1894.

subterráneos que parecían propagarse desde la cordillera Oriental. La alarma se trocó en temor al notar que pardas nubes, como de ceniza, escurecían el cielo del nordeste, aunque no se conocía volcán alguno en actividad en esa región al cual poder atribuir tan temeroso fenómeno.” (Burbano J.I. 1958. pg. 514)²³. Este evento condujo a que el Comité Nacional de Geodesia y Geofísica organice una comisión para que investigue el sitio de origen de dichas cenizas, la misma que estuvo integrada por el General Telmo Paz y Miño, que la presidió, Jonás Guerrero profesor de geología y Cristóbal Bonifaz J., participó también Aurelio Dávila G.. El grupo se trasladó por el camino de Papallacta a Baeza.

Telmo Paz y Miño²⁴, en el informe que remite al Ministro de Educación Pública, con fecha 26 de Febrero de 1931, hace relación a reportes previos que señalaban la existencia de un volcán en el sector nororiental ecuatoriano. Se refiere a una carta dirigida por el señor don Nicolás G. Martínez, Director Interino del Observatorio Meteorológico, al doctor Pedro Reimburg, la que fue publicada en el diario el Comercio Númrs. 2045-51 que corresponde a los días 24 al 30 de Julio de 1912, en ella Martínez descarta que las cenizas que cayeron en Febrero y Marzo de ese año en Quito y en otras ciudades correspondan al Cotopaxi, sugiere *“que la causa hay que buscarla en aquel volcán desconocido por los sabios, pero muy conocido por los caucheros, que lo llaman “Reventador”, y situado en el Oriente, en las cabeceras del Río Coca”*. Ante la caída de cenizas de marzo de 1926, Martínez al Director ele "El Comercio", y publicada en dicho diario, N^o 7369, el domingo 28 de Febrero de 1926, se ratifica en lo señalado en la comunicación de 1912, reiterando que el origen de las cenizas corresponde al “Reventador”. Paz y Miño también citan referencias sobre ese volcán atribuidas a Joseph H. Sinclair tanto en cartas públicas (El Comercio", N 7986, de 6 de Noviembre ele 1927, y en "El Comercio" N. 8070, correspondiente al 29 de Enero ele 1928, las dos dirigidas a Nicolás G. Martínez), como en la publicación "In the Land of Cinnamon: a Journey in Eastern Ecuador, by Joseph H. Sinclair - (with separate map. Pl. III, facing p. 216)- Reprinted from The Geographical Review -Vol. XIX, N. 2, April, 1929 - pp. 201-217".

La expedición presidida por el general Telmo Paz y Miño partió de Quito 22 de Diciembre de 1930, por la ruta Pifo – Papallacta – Baeza. Reporta que el 24 de Diciembre de 1930, en un día que amaneció bastante despejado, desde las Pampas, observaron al Reventador a los N21°E. El 4 de Enero de 1931, a una cota aproximada de 3.200 mts., desde un sitio que se encontraba cubierto de una gruesa capa de ceniza, donde instalaron un “rancho”, observaron la silueta del volcán que se levantaba unos 200m con relación al sitio en el que se encontraban. El 5 de Enero de 1931 ascendieron hasta los 3.480 m, el punto más alto y que correspondía al cráter.

El Reventador, uno de los volcanes más activos de Ecuador, se localiza en la parte norte del levantamiento Napo, a 90 km al este de la ciudad de Quito, a 38 km al este del volcán Cayambe y a 54 km al norte del volcán Sumaco. El complejo volcánico El Reventador está constituido por una secuencia de productos efusivos (flujos de lavas) y explosivos (caídas de cenizas, flujos piroclásticos), así como avalanchas de escombros que alcanzan espesores de alrededor de 1.000m, estas recubren formaciones mesozoicas que afloran en la región. Tres grandes unidades se han identificado las que corresponden a igual número de edificios volcánicos que se relacionan con las principales etapas de evolución del complejo volcánico, a saber: Complejo Volcánico Basal (CVB), Volcán Paleo Reventador (VPR) y el Volcán El Reventador (VER) -este cono se ha formado por una actividad moderadamente explosiva estromboliana

²³ Burbano José Ignacio. 1958. La Vía Interoceánica San Lorenzo - Amazonas-Belem. En: Boletín de Informaciones Científicas Nacionales No. 85. Casa de la Cultura Ecuatoriana. Quito

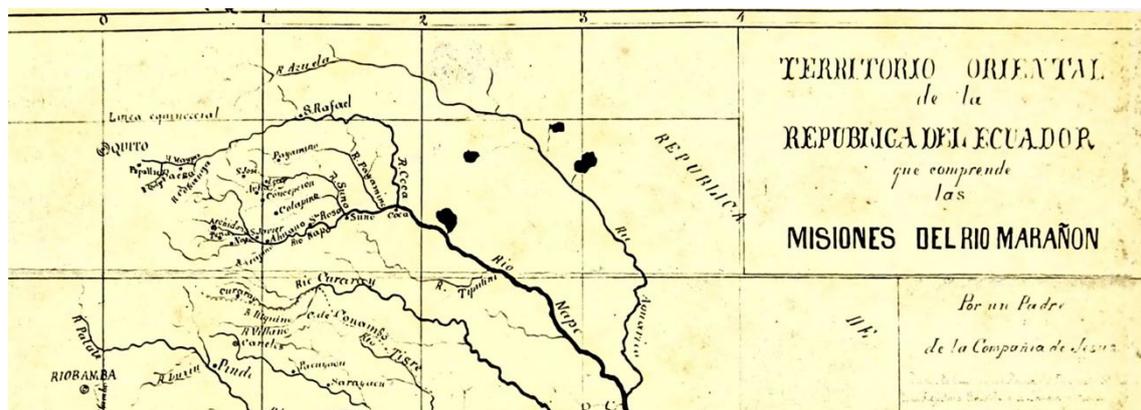
²⁴ Paz y Miño T., Jonás Guerrero y Cristóbal Bonifaz. 1931. La Exploración al Reventador. Informe de la Comisión del Comité Nacional de Geodesia y Geofísica. Publicaciones del Ministerio de Educación Pública. Quito <http://repositorio.casadelacultura.gob.ec/bitstream/34000/1317/1/FR1-L-000753-Paz-y-Mino-Exploracion.pdf>

(INECEL, 1988)²⁵. El Reventador actual, morfológicamente, está constituido por un estratocono activo holocénico, que alcanza una elevación de 3.562 msnm (Hall, 1977)²⁶, ubicado en el interior de un gran anfiteatro producido por el colapso volcánico-tectónico de al menos dos antiguos centros volcánicos, asociados con depósitos de avalanchas de escombros que rellenan el cauce del Río Coca (AVL1 y AVL2) (INECEL, 1988). El volcán El Reventador ha tenido al menos 31 eventos eruptivos desde 1541, siendo las más recientes en julio 1972, noviembre 1973, enero-mayo 1976, noviembre 2002 (esta última cubrió con un manto de ceniza a la ciudad de Quito) y noviembre 2016 – hasta la presente fecha.

Al volcán El Reventador le caracteriza un volcanismo calco-alcalino con una cierta signatura adakítica²⁷ similar a la que presentan los volcanes holocénicos Cayambe y Antisana de la Cordillera Real (Barragan R. y Patrice Baby, 2004)²⁸.

Petrográficamente las tres secuencias estratigráficas del volcán El Reventador presentan una substancial similitud en sus características mineralógicas. Sus lavas corresponden a una sucesión de andesitas basálticas, andesitas, y dacitas. Lavas son porfiríticas, con una paragénesis de fenocristales cuyo contenido varía dependiendo del grado de evolución en dichos magmas. Las lavas andesíticas, olivínicas en su gran mayoría, frecuentemente muestran inclusiones de xenolitos arrancados de las paredes de las chimeneas (areniscas Hollín, calizas Napo y volcánicos Misahuallí), también se han encontrado de rocas intrusivas gabróicas (INECEL, 1986)²⁹.

5.5.2 Río Coca o Río Quijos



Mapa 2: Mapa tomado de: *La Misión del Napo*, por el P. L. L. S., S.J. 1894, elaborado "Por un Padre de la Compañía de Jesús". En este se señala el poblado "Por un Padre de la Compañía de Jesús". En este se señala el poblado de "S. Rafael", y se grafica el curso del río Coca.

El río Coca, según M. Villavicencio (1858)³⁰, "toma el nombre después de haber recibido el San Francisco, el Quijos i el Cozanga. El San Francisco está "formado por el Oyacache i otros del páramo de Pisambillo y Cayambe"; al Quijos lo forman "el río de este nombre, i por el Mazpa"; "el Cozanga trae su oríjen de la cordillera del Antisana [...]. El río Mazpa que

²⁵ INECEL, 1988- Estudio Vulcanológico de El Reventador. Ministerio de Energía y Minas / INCECEL. Quito - Ecuador, 1 17p

²⁶ Hall M., 1977 - El volcanismo en el Ecuador. Publicación del Instituto Panamericano de Geografía e Historia, Sección Nacional del Ecuador, Quito, 120 pp.

²⁷ Adakita refiere a una serie rocas ígneas, volcánicas o plutónicas, comúnmente encontradas en arcos volcánicos y que se caracterizan por tener entre otras cosas proporciones altas de Sr/Y y La/Yb (Wikipedia).

²⁸ Barragán R. y Patrice Baby. 2004. Evolución Magmática Actual De La Zona Subandina: Volcanes El Reventador y Sumaco, Modelos Geodinámicos Preliminares. En: *La Cuenca Oriente: Geología y Petróleo*. Editores Científicos: Patrice Baby, Marco Rivadeneira, Roberto Barragán. IFEA IRD PETROECUADOR. Quito.

²⁹ INECEL, 1986. Estudio Geológico del Volcán Reventador. INECEL – Proyecto Geotérmico. Quito.

³⁰ Ídem (Villavicencio M. 1858)

consideramos como el origen mas retirado del Coca, nace de los lagos del Encantado i Papallacta [...], i corre con el nombre de Mazpa hasta unirse con el Quijos, llevando este nombre hasta su unión con el Cozanga". T. Wolf (1892)³¹, de su parte, expresa que el río Coca se inicia desde la unión del Quijos con el Cozanga. Juan de Velasco (1789)³² indica "Desde aquí juntos los dos ríos (Mazpa – hoy conocido como Papallacta- y Cozanga), compuestos ya de otros muchos menores, toman el nombre del río de la Coca, muy rápido y caudaloso". Los dos geógrafos, así como Juan de Velasco concuerdan que el nombre de río Coca se inicia en la unión del río Quijos (Mazpa) con el Cozanga, a pocos km de Baeza; Rafael Cáceres (1892)³³ señala que los "orígenes del río Coca están en los dos grandes ríos Quijos y Cozanga, que nacen del N. E. y del E. del Antisana". En contraste, los mapas del IGM (Hoja "Volcán Reventador" (1:50.000) nombra como "Río Quijos" al segmento aguas abajo de la confluencia con el río Salado, denominación que continúa en la Carta Topográfica Atenas (CT-OIII-B1) hasta la confluencia del río Paushiyacu (¿río Machacuyacu?), a partir de la que se lo denomina Río Coca; pero, en el mapa geológico del Volcán Reventador (1988), elaborado por INECEL, se lo nombra Río Coca desde la confluencia del Quijos con el Salado.

Simón Bustamante (1951)³⁴ menciona que el río Coca toma el nombre a partir de la confluencia del Quijos con el Salado, denominación que se mantiene en los mapas geológicos de INECEL. Añade Bustamante que el río Quijos se forma a partir de la unión del río Maspá (Papallacta) y el Cozanga.

Un rasgo interesante del río Coca, aguas debajo de la cascada, a unos 30 km, está el denominado paso histórico o paso de los monos, que encontró Pizarro y a través de él lograron cruzar el caudaloso Río Coca. de J. Chantre (1775)³⁵ (p. 10) lo describe en los siguientes términos: "No quedaron menos sorprendidos, cuando, vencidas otras cuarenta leguas en seguimiento del río, observaron que todo el golpe inmenso de aguas se estrechaba entre dos peñas, y se reducía á un tan angosto canal, que de una á la otra banda sólo habría como veinte pies, sobreponiéndose

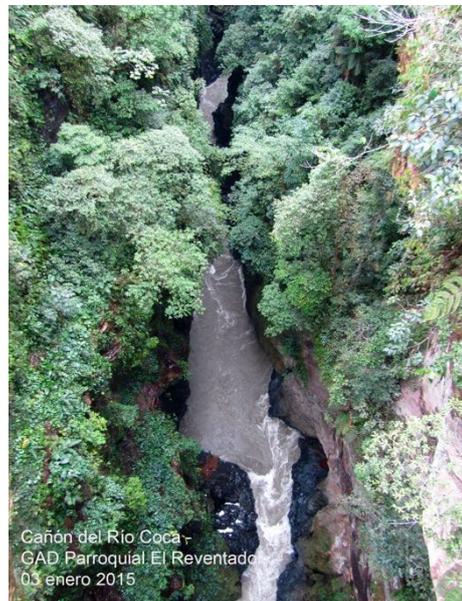


Foto 1: Paso Histórico sobre el Río Coca, cruza una garganta de no más de 6m de ancho (foto izquierda). El Río Coca se encañona, el cauce no tiene más de 25m de ancho en el fondo (foto derecha).

³¹ Wolf, T. 1892. Geografía y Geología del Ecuador. Tipografía de F. A. Brockhaus. Leipzig. Edit. Casa de la Cultura Ecuatoriana – Quito. 1975.
³² de Velasco J. 1789. Historia del Reino de Quito en la América Meridional. Tomo I y Parte II que contiene La Historia Antigua. Empresa Editora El Comercio, 1941. Quito
³³ Cáceres R. R.J. 1892. La Provincia Oriental de la Republica del Ecuador: Apuntes de Viaje. Imprenta de la Universidad. Quito
³⁴ Bustamante S. 1951. Las Tenebrosas Cataratas del Río Coca. Domingo: Magazine para todos No. 112. Año III – Quito. Domingo 13 mayo de 1951. Diario El Comercio.
³⁵ Ídem (Chantre y Herrera P. 1901)

tanto á las aguas los empinados peñones que desde su cima á la corriente creyeron contarse á poco más ó menos otras doscientas brazas."

El paso histórico por donde atravesaron los conquistadores fácilmente en busca de la canela, se localiza en la parroquia El Reventador, en el Recinto Simón Bolívar, kilómetro 74 vía Lago Agrio – Quito. Originalmente existía un puente de 6 metros para cruzar el encañonado del río Coca siendo este lugar el más estrecho. En este punto, el encañonado que tiene unos 2.4 kilómetros de largo, se divide en tramos de 1300 m, 120 m y 460 m de longitud cuyo ancho, en la parte superior está entre los 6 y 40m, estos tramos están interrumpidos por dos encañonados de 450 m y 280 m de largo que tienen un ancho promedio de entre 50 m y 80m. En el paso histórico el río pasa a unos 120 metros de profundidad por un canal que varía entre 10 y 30 metros de ancho.

5.5.3 Cascada del Coca (San Rafael)

La cascada de San Rafael, sin duda la más recordada por los ecuatoriano y muchos de los extranjeros que la visitaron. Se ubicó en los límites de las provincias de Napo y Sucumbíos, en la zona de transición entre la cordillera Andina y la Amazonía del Ecuador, en el Parque Nacional Cayambe Coca. La cascada tuvo con una altura aproximada de 130 metros cono 65 metros de ancho; 7.5m de ancho en el canal de desfogue antes del primer salto y 14m de ancho a la salida del segundo salto, mientras que entre el primero y segundo salto existía una "marmita de gigante" de unos 37m de diámetro. Un flujo de lava del volcán Reventador, que represó al río Coca hace menos 12.000 años³⁶, dio origen al salto. Esta singularidad paisajística constituía un importante y emblemático atractivo turístico, no solo de la zona, sino también del país. Anualmente la visitaban entre 15.000 y 20.000 turistas.

Esta cascada llamó la atención de los exploradores españoles liderados por Gonzalo Pizarro que partieron de Quito en busca de la tierra de la Canela en 1541; ellos recorrieron el Valle del Coca, y desde donde Orellana continuaría el viaje al mando de 50 expedicionarios hasta llegar al Marañón o Amazonas y posteriormente a España. En su tránsito por el sector del alto Coca, escucharon un estruendo amortiguado cuando aún estaban a más de 25 km río arriba. J. Chantre (1775)³⁷, p. 10 describe lo percibido por los exploradores españoles durante esa jornada, declarando en el prólogo (pp. XVI) con respecto a la expedición de Gonzalo Pizarro *"tomo todo de los autores del Perú, sin alterar nada en la sustancia porque aunque hallo en él tal cual cosa que no dice muy bien con la Geografía que me he visto precisado á observar cuidadosamente de aquellas tierras, [...]"*:

"De esta manera caminaron por una de las orillas del rio como cincuenta leguas, cuando empezaron á oír un ruido sordo como á alguna distancia, el cual se dejaba sentir con más viveza mientras más andaban Parecióles, [...], que un tan continuado estruendo solo la podía causar alguna gran cascada, en que el golpe de las aguas del río se precipitase desde alguna altura sobre tajados peñascos. No se engañaron en la conjetura, porque como á seis leguas del sitio en donde comenzaron á percibir el ruido, vieron las aguas, precipitándose de un peñón de más de doscientas brazas, causaban un estruendo inexplicable, admirándose todos de cosa tan extraña y prodigiosa".

Juan de Velasco (1789, II. 2. 8), de su parte, describe que los españoles, al mando de

³⁶ En el primer reporte se señaló 20.000 años, pero recientes dataciones estiman que pudiese ser menos de 12.000.

³⁷ Chantre y Herrera P. (Manuscrito de 1775). Historia de las Misiones de la Compañía de Jesús en el Marañón Español 1637-1767. Imprenta de A. Avrial. Madrid 1901. (http://www.larramendi.es/es/catalogo_imagenes/grupo.do?path=1032021)

Pizarro «Llegaron a un sitio, donde con espantoso rumor, que se oye muchas millas antes, se precipitan todas sus aguas desde la altura de 200 brazas vulgares. A esta salto seguía un estrecho canal, largo y profundo como otras 200 brazas y ancho solamente 20 pies castellanos³⁸».

“El Coca desde su origen hasta su cascada, corre encañonado entre las cordilleras de Guacamayos i Galeras, por un lecho profundo i de escarpados peñascos ; estrechándose tanto en algunas partes, i principalmente encima de la cascada, que á pesar de su gran cantidad de aguas se estrecha tanto, que un palo chico le serviría de puente. La cascada es majestuosa, pues se precipita como de 50 varas de elevación, con gran estruendo, produciendo en su caída una grande fosa, desde cuyo fondo vuelven á subir las aguas para precipitarse nuevamente, formando penachos, i en seguida tranquilizarse para formar como un lago i correr algunas cuadras.” (Villavicencio, 1858). T. Wolf (1892) hace referencia de un “antiguo lugarejo de San Rafael” localizado a 15 leguas (aprox. 72 km) de la confluencia del Quijos con el Cozanga, es la primera referencia a dicho nombre, pero no hace mención a la cascada.

Schauenberg (1970)³⁹ describe la cascada como “Escondida en la selva virgen y velada por una niebla permanente, la caída del Río Coca, que aún no aparece en ningún mapa publicado, cayó en el olvido hasta el 2 de enero de 1945, cuando el geólogo suizo K. T. Goldschmid lo redescubrió, algo más de 400 años después de Gonzalo Pizarro”. Propuso, al no haber ningún autor antiguo que haya dado nombre a esta cascada, que se la llame “Salto de Goldschmid” en homenaje al geólogo suizo K. T. Goldschmid, que lo descubrió. S. Bustamante (1978)⁴⁰, en relación con el nombre de la cascada señala: “La existencia de la Catarata de San Rafael, en el río Coca, quedó olvidada por espacio de varios siglos, prácticamente desde cuando recibió ese nombre en memoria del célebre misionero jesuita P. Rafael Ferrer, victimado en 1611 por los caciques quijos”; en el mapa de 1894 se detalla un poblado cercano el mismo que lleva el nombre “San Rafael” (ver Mapa de la Misiones del Río Marañón).

La cascada constaba de dos saltos sucesivos, si bien existen descripciones que habrían sido 3. Las aguas del río se encausaban por primer canal de unos 6m de ancho ingresa a una especie a una marmita de gigante de unos 16m de diámetro, para luego encausarse a un canal de unos 14 m de ancho e ingresar al primer salto de unos 30 m de altura hasta una plataforma (rellano) y precipitarse desde una altura de 100-110 m hasta el lecho del río y continuar aguas abajo (valores aproximados todos). Las paredes rocosas de la colada de lava (¿8.000 a 12.000 años?) de El Reventador contenían una cobertura vegetal compuesta de una vegetación típica de ceja de selva o de bosques siempre verde pie montanos. Estuvo poblado de árboles, orquídeas y arbustos en la parte superior del flujo, y de helechos, musgos y bromelias entre otras en el acantilado del imponente circo que se configuraba. A consecuencia del choque del agua con las rocas del fondo de la cascada, en el anfiteatro prevalecía una humedad permanentemente debido a la niebla o agua atomizada que se formaba al pie de la cascada. Esta singularidad natural se constituyó, por lo estrecho del sitio, en una suerte de represa que contenía las aguas en épocas de grandes caudales -en el terremoto de marzo de 1987, en este punto se produjo un represamiento de unos 20 m de altura (Anexo 1: Foto No. 18)-.

En el reporte de 1970⁴¹, Bustamante describe a la cascada de San Rafael con tres saltos:

³⁸ El “estrecho canal, largo y profundo”, corresponde al conocido “Paso Histórico” o “Paso de los Monos” que se localiza a unos 20 km aguas abajo del sitio en donde estuvo localizada la cascada.

³⁹ Schauenberg Paul. Le volcán El Reventador et la chute du Rio Coca (Cordillera Real de los Andes, Equateur). In: Le Globe. Revue genevoise de géographie, tome 110, 1970. pp. 83-105

⁴⁰ Bustamante S. 1978. Proyecto Coca: Energía para el Futuro. El Comercio 209 de enero 19788. Quito.

⁴¹ Bustamante S. 1970. Proyecto Quijos – Coca. AIDI Boletín No. 12 – Mayo 1970. Quito

“La bocana (de las cascada) -de unos 20 metros de ancho- está compuesta por dos espolones de roca: el occidental es ancho, alto, cubierto de selva y no permite desbordamientos superiores; el oriental es una roca azulada, compacta, con perfil de represa natural, que se transforma en vertedero en las grandes crecientes.

La bocana, de unos 20 metros de ancho, permite el paso del río con caudales normales, produciéndose el primer, que cae en una poza algo redondeada. En crecientes la bocana no admite grandes caudales y estos, se represan formando una especie de lagunas cuyas influencia se remontan unos 500 m. aguas arriba.... El agua que ha caído en la poza, luego del primer salto cuya altura es pequeña (quizá del orden de los 10.00m) se revuelve ferozmente...[. La masa de agua se precipita al profundo abismo... [. Es el segundo salto, girando considerablemente hacia el occidente respecto del primero. Este segundo salto se precipita sobre una especie de escalón rocoso en medio de la escarpa.... Desplazada por el choque violento del salto, el agua se incrusta en oquedades laterales de roca, a manera de cuevas. Este segundo salto... tendrá quizá uno 30 m. de altura. El tercer salto, es el mayor, el más hermoso y espectacular. Debe tener alrededor de 100m de altura (altura total 140m)”. (Anexo 1: Foto 16)

Durante su permanencia en San Rafael, Bustamante hace estimaciones del caudal del R. Coca, indicando que el caudal promedio era de unos 300 m³/s, sin embargo, la temporada cuando él estuvo allá según su reporte fue extremadamente lluviosa y estimó unos caudales de 12.000 m³/s (4-Enero-1970) y 15.000 m³/s (7 enero-1970), esta última ¿Talvez crecida milenaria?. Si bien Simón Bustamante, describe una cascada con 3 saltos, quizá fue debido a la extrema crecida que experimentaba el río Coca que habría ocasionado la formación del salto superior, el más pequeño como él lo describe, ya que fotos anteriores, Goldshmitd (1945) (Anexo 1: Foto 14) y Shaunberg (1968) (Anexo 1: Foto 15), y también en las posteriores, no se observa ese salto superior, si bien en la foto original de Hirtz (Anexo 1: Foto 17) y de Carrasco (Foto 18, círculo celeste) se observa una suerte de caída aguas arriba del primer salto (numerado desde el curso superior de la cascada). Excepto la descripción de Simón de 1970 y lo observado en las fotos de Hirtz y Carrasco, en las fotografías a partir de 1996 (Foto 19) la cascada está integrada por 2 saltos (Anexo 1: Foto 19 hasta 25 (2014)) hasta el 2015, año en el que se distingue un solo salto (Anexo 1: Fotos 25 (2015) y 26).

La cascada de San Rafael formó parte del Parque Nacional Cayambe Coca. Los cofanes, en el marco de un convenio de cooperación con el Ministerio del Ambiente y Transición Ecológica (MAATE) para el control y vigilancia, ejercen presencia en una extensión de 120.000 hectáreas ubicadas en la Reserva Cayambe Coca entre los ríos Cofanes, Due y la cascada de San Rafael⁴²; está última, localizada entre los límites de las provincias de Napo y Sucumbíos, era reconocida por los ancestros cofanes como una cascada sagrada⁴³.

6 Desaparición de la cascada

La formación de cascadas debido al emplazamiento de flujos de lava son frecuentes; muchas de ellas son relativamente transitorias, tienden a modificar las gradientes naturales de la corrientes de agua al constituirse en una ruptura brusca (*knickpoints*) de la pendiente del lecho de un río a lo largo de su perfil longitudinal, creando con ello a lo largo del valle aguas arriba zonas de relleno aluvial; estos puntos de ruptura, dependiendo de la consistencia de los

⁴² Gea-Izquierdo E, Patiño N, editores. Características socioculturales, demográficas y de salud pública de las nacionalidades indígenas del Ecuador. Quito: Pontificia Universidad Católica del Ecuador; 2021.

⁴³ XA Méndez León · 2011. Gente invisible de la selva. Sustento teórico del video documental que trata sobre la nacionalidad a'í (Cofán) de Sucumbíos. <https://dSPACE.ups.edu.ec/bitstream/123456789/1298/14/UPS-QT00772.pdf>

materiales, pueden ser temporales o permanecer por varias centenas de miles de años (El Río Palouse, en el sureste de Washington, se precipita 60 metros a través de acantilados creados por flujos de lava de hace casi 16 millones de años; Svartifoss (cascada Negra) es una cascada en el Parque Nacional Skaftafell en Islandia -la base de esta cascada está repleta de rocas afiladas que se han desprendido de las columnas de lava hexagonales-). Sobre el *knickpoint*, una vez que el agua lo ha superado – en el caso que haya rellenado un valle- se genera una caída que genera una mayor erosión y transporte de los sedimentos. (Costa y Schuster, 1988; van Gorp et al., 2013, 2014; Abbott et al., 2015)⁴⁴.

A nivel mundial se han descrito pocos ejemplos y modelos conceptuales relativos a los procesos de colapso de diques formados por flujos de lava (por ejemplo, Costa, 1985; Hamblin, 1994; Crow et al., 2008). En la mayoría de las presas naturales, los mecanismos de colapso suelen producirse mediante el desbordamiento, la rotura, la canalización y la filtración (Costa y Schuster, 1988). A lo largo del río Colorado dentro del valle del Gran Cañón (Fenton et al., 2004, 2006; Hamblin, 1994) se estima que al menos 200 restos de represamientos por lava perturbaron el gradiente del río Colorado durante el Pleistoceno (Hamblin, 1994; Rugg y Austin, 1998). En general, la evolución de las presas de lava implica dos etapas: (1) un evento temprano de emplazamiento del flujo de lava que toma periodos de tiempo cortos y, (2) una etapa posterior de desaparición que puede ocurrir relativamente pronto después de la formación de la represa (Rugg y Austin, 1998) o perdurar por varios miles de años.⁴⁵

Procesos erosivos que afectaron a flujos de lava, debido a la acción hídrica, fueron advertidos por Alberto D. Semanate en 1951⁴⁶. Destacó la intensidad erosiva de las aguas del río Pastaza sobre las lavas basálticas localizadas en la garganta de San Martín, cercana a la población de Baños de Agua Santa, señalando:

“Si algún día llegamos a descubrir la proporción erosiva de las aguas del Pastaza, es decir, el desgaste anual que este río efectúa en el basalto de la garganta de San Martín, no nos será difícil hallar la edad tanto de la laguna, como de la reventazón de Pondoá. Tenemos barruntos de que el tiempo gastado por el Pastaza en este trabajo no baja de unos 2.000 años. Después de esta reventazón, el cauce del Pastaza, en la sección del puente de San Martín, debió pasar a flor de tierra y terminarse en una cascada de unos por lo menos, ochenta metros de altura. Al retroceder el Pastaza, río arriba, fué cortando la roca y cavando el cauce profundo actual. Es, pues, un ejemplo clásico del tránsito de la cascada a la garganta.” (pg. 145).

⁴⁴ Reyes J. et. Al. 2021. Exceptionally uncommon overburden collapse behind a natural lava dam: Abandonment of the San-Rafael Waterfall in northeastern Ecuador. Journal of South American Earth Sciences. Volume 110, October 2021, 103353. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0895981121002005?via%3Dihub>

⁴⁵ Ídem. Reyes J. et. Al. 2021

⁴⁶ R. P. Alberto D. Semanate O. P. 1951. Baños y sus alrededores. Historia Geológica del Tungurahua y del Pastaza. Boletín de Informaciones Científicas Nacionales Vol. IV. No. 41. Agosto y Setiembre de 1951. Quito. Biblioteca Nacional del Ecuador "Eugenio Espejo".

El proceso erosivo que acontecía en el río Pastaza, también fue analizado por Jorge Sevilla, exfuncionario del ex-Instituto Ecuatoriano de Electrificación (INECEL). En 1989, expresó que el ejemplo de retroceso de la cascada Agoyán, ubicada en Tungurahua, debe ser



Foto 2: Cascada Agoyán 1950? (Foto: Rolf Blomberg) y en el 2021 (Foto: Jorge Sevilla), evidencia la magnitud del proceso erosivo de la misma en 70 años.

tenido en cuenta en los proyectos de aprovechamiento de agua en los que se encuentran inmersas otras cascadas, como es el caso de San Rafael en el río Coca⁴⁷. Sustento de su alerta fue el retroceso que observó de la cascada Agoyán, la que, en esa época, estaba a 1.500 metros de la represa de la Hidroeléctrica Agoyán. Un análisis de fotografías aéreas e información histórica evidenciaron que esa caída de agua se había movido aguas arriba, alrededor de 800 metros, entre 1956 y 1959; mientras que entre 1972 y 1976, la cascada retrocedió alrededor de 50 metros adicionales⁴⁸. Ante esa advertencia, anticipándose a los posibles efectos de este retroceso erosivo que potencialmente pudiesen afectar a la central Agoyán que entró en funcionamiento en septiembre de 1987, se levantó en la margen izquierda del río Pastaza un muro de hormigón que ralentizó el proceso erosivo⁴⁹.

Si bien se llamó la atención de que era necesario observar el comportamiento de la cascada de San Rafael, no se dio la importancia debida sean ya por las autoridades de INECEL de aquel tiempo, ni posteriormente por parte de las entidades que continuaron con los estudios para desarrollar el proyecto hidroeléctrico Coca Codo Sinclair. Vale advertir que en los estudios de impacto ambiental⁵⁰ la única referencia a una posible desaparición de la cascada consta en la pg. V-260, en “V.4.11 Imprecisiones Sobre el Proyecto CCS” al referirse a los impactos del Proyecto COCA CODO SINCLAIR. Allí se manifiesta que tanto personeros de los gobiernos locales como miembros de las comunidades del área de impacto directo disponían de información sobre el proyecto y que esta circuló entre todos los grupos y estratos sociales. Para destacar que la información sobre el proyecto “es de conocimiento desigual a veces incompleto o equivocado” señalan, de manera anecdótica: “[...] Así, por ejemplo, en el imaginario de la población juvenil, se asume como hecho que la Cascada San Rafael desaparecería si se ejecuta el Proyecto, y se organizan viajes de paseo a la cascada para verla por última vez; [...]”.

La pregunta que surgió, una vez que se conoció de la desaparición de la cascada, acontecida el 2 de febrero del 2020, fue ¿por qué desapareció la cascada?. Como ya se había comentado señalado, hubo dos vertientes: 1) atribuir la desaparición a la construcción de la represa que, por la retención de sedimentos, dio origen a las “aguas hambrientas” o “aguas

⁴⁷ Sevilla, J. 1989. Un Ejemplo de Erosión Retrocedente: La Cascada Agoyán. Primer Simposio Latinoamericano sobre Desastres Naturales / Mitigación y Vigilancia de los Fenómenos Geodinámicos. Pg. 119 - 124.

⁴⁸ Sevilla J. 1990. Un exemple d'importants glissements de terrain en Equateur. Proceedings Sixth International Congress International Association of Engineering Geology. 6-10 August 1990. Amsterdam Netherlands. Editor D.G. Price. Del University of Technology, Delft, Netherlands. Pg. 1713 - 1717.

⁴⁹ El riesgo en la cascada San Rafael se advirtió en 1985. El Comercio 27 junio 2020. Quito.

⁵⁰ Estudio de Impacto Ambiental Definitivo. Proyecto Hidroeléctrico COCA CODO SINCLAIR. COCASINCLAIR S.A. FINAL. V Descripción del Entorno Línea de Base. Mayo 2019. <https://www.yumpu.com/es/document/read/16148577/ver-documento-hidroelectrica-coca-codo-sinclair>

blancas”; o, 2) un proceso de origen natural.

6.1 Desaparición de la Cascada: Hipótesis

El colapso de la cascada hay dos hipótesis ha conducido que se planteen dos hipótesis.

La primera hipótesis atribuye la desaparición a las alteraciones fluvio morfológicas que se habrían dado a consecuencia de la construcción de la captación de CCS, las que habrían jugado un papel decisivo en el proceso de debilitamiento y colapso de la cascada de San Rafael. Las alteraciones están asociadas con las implicaciones que se derivan al obstaculizar el normal flujo de sedimentos en los ríos por la construcción de obras de infraestructura en el cauce que tienden a alterar el equilibrio dinámico del río y, por ende, los procesos de erosión/sedimentación. Estas alteraciones contribuyen a incrementar la tasa erosiva del río y la pérdida de sedimentos de fondo, pudiendo ser los factores que favorecieron las infiltraciones ya existentes a través del contacto entre los sedimentos retenidos y el flujo de lava, adelantando el proceso natural de desaparición.

La segunda hipótesis atribuye a un fenómeno natural, fundamentada en que la erosión que toda cascada es un proceso que se evidencia en decenas, centenas o miles de años, dependiendo del sustrato geológico en dónde se ha desarrollado. En el caso de la cascada de San Rafael, desde el momento que se activó se inició el proceso erosivo hasta que finalmente desapareció..

6.1.1 Aguas Hambrientas o Aguas Blancas

Con respecto a las aguas hambrientas, la hipótesis de la desaparición hace relación a la presencia de la represa para la captación de aguas para el PHCCS, en la que se toma un porcentaje del caudal para, a través de un túnel de aproximadamente 24km, llevarlo al vaso compensador, desde donde se canaliza por una tubería de alta presión, aprovechando un desnivel de 640m, hasta la casa de máquinas para la generación eléctrica. La represa disminuye la carga de sedimentos que transporta el agua, la que luego es retornada al río a través de los vertederos de la presa. La presencia de esta infraestructura, que actúa como una barrera que frena el flujo del río altera la dinámica hidrológica del río, se traduce en la disminución del caudal, la interrupción de la carga natural de sedimentos y la pérdida de energía cinética (movimiento) del flujo.

Se bien se reconoce que toda cascada tiende a erosionar sus bases lo que conduce a que retroceda y finalmente desaparezca, destacando que en el caso de San Rafael la presencia del arco cóncavo al pie de la cascada, en la margen izquierda, es producto de la fuerza erosiva de la caída. La pregunta que se hace en el marco de esta hipótesis es ¿Por qué la cascada colapsó solo seis años después de represado el río? la misma que estuvo activa por más 8000 años. Plantean un estudio profundo para entender esa relación. Como argumento de la estabilidad de la cascada en el tiempo se hace relación a que en 1987 se produjo en la zona un sismo que provocó grandes deslizamientos y daños en todo el sector, pero que la cascada lo “sobrevivió” así como al aluvión que se generó inmediatamente después del sismo. Concluyen que “la estructura y frente de la cascada pudo verse seriamente debilitada por los procesos erosivos desencadenados en el río desde la construcción de CCS – la represa se inauguró en noviembre del 2016-”.⁵¹

⁵¹ Cobo, E. 2021. Tag: Aguas hambrientas - Cuando el Río se Rebeló. <https://wasserimfluss.wordpress.com/tag/aguas-hambrientas/>

Estudios realizados por la EPN en la CHRC, sobre las tasas de erosión antes y después de la construcción de la Central Hidroeléctrica Coca Codo Sinclair CHCCS, determinaron un aumento del 42% en la tasa de erosión, medida en la estación en San Rafael, luego de la construcción de la CHCCS. El estudio, señala, sin embargo, que el modelo no pudo ser calibrado debido a la imposibilidad de tener datos de las batimetrías que se hayan realizado previamente en la captación. No obstante aquello, expresan que el proceso de erosión regresiva estaría asociado a la construcción y operación de la CHCCS, y *“que estaría produciendo el conocido fenómeno de ‘Aguas Blancas’ en el Río Coca”*.⁵² La hipótesis de las “aguas hambrientas” fue presentada en el JUICIO NO. 22281 2020 00201 como una de las causas por las que desapareció la cascada San Rafael.⁵³

La tesis de “aguas hambrientas” también lo ha sostenido el Grupo de Discusión – Hidrología Ecuador, quienes remitieron el 8 de septiembre de 2020, una comunicación al Presidente de la República, Lenin Moreno Garcés y a otras autoridades, en la que expresan su preocupación y sugieren recomendaciones sobre problemática en la cuenca del río Coca. Destacan que lo que está aconteciendo en la zona pone en riesgo tanto a la seguridad hídrica y energética nacional, a la infraestructura estratégica para el país y a la vida de las personas en las áreas afectadas. Señalan que el sistema de captación de la Central Hidroeléctrica Coca-Codo Sinclair impacta negativamente el flujo natural de sedimentos aguas abajo, lo que conduce a generar el efecto de “aguas hambrientas”. Sustentan el argumento en base a los modelos realizados por le EPN que mostraron un incremento en las tasas de erosión del 42%, justamente en la sección donde se produjo la desaparición de la cascada. Destacan que la primera manifestación de estas “aguas hambrientas” y el inicio del proceso erosivo aconteció el 2 de febrero de 2020 con el colapso de la cascada de San Rafael.

Un estudio realizado por la ESPE el ¿2013? destaca que por la implementación del PHCCS, en especial por la presencia de la represa, se esperaría un cambio en el régimen hídrico, haciendo énfasis en la retención de sedimentos en el embalse aguas arriba del vertedero de derivación, lo que provocará un incremento en la capacidad de transporte del río y con ello un incremento en la erosión hasta que el río recupere el perfil de equilibrio⁵⁴. Sin duda este proceso aconteció en el trayecto entre la represa y la cascada (aprox. 18 Km) y luego aguas abajo del salto natural.

Las presas, sin discutir el propósito para el que se las construye, retienen sedimentos, alteran / regulan los picos de crecida y contribuyen a redistribuir el comportamiento estacional de los caudales; implica que modifican el carácter y el funcionamiento de los ríos. Estas infraestructuras tienden a modificar / perturbar los canales aluviales y, consecuentemente, las características de los regímenes de flujo originales y el flujo de carga de sedimentos. Aguas arriba del embalse se depositan los materiales que transporta el río; mientras que aguas abajo el agua liberada de la presa tiene poca o ninguna carga de sedimentos. A esta agua clara liberada se la conoce como agua hambrienta, por su capacidad para erosionar el lecho y las orillas del río después de la construcción de la presa, este proceso se mantiene hasta cuando las aguas alcanzan el equilibrio de la carga sedimentaria, punto al partir del cual el material ya no puede

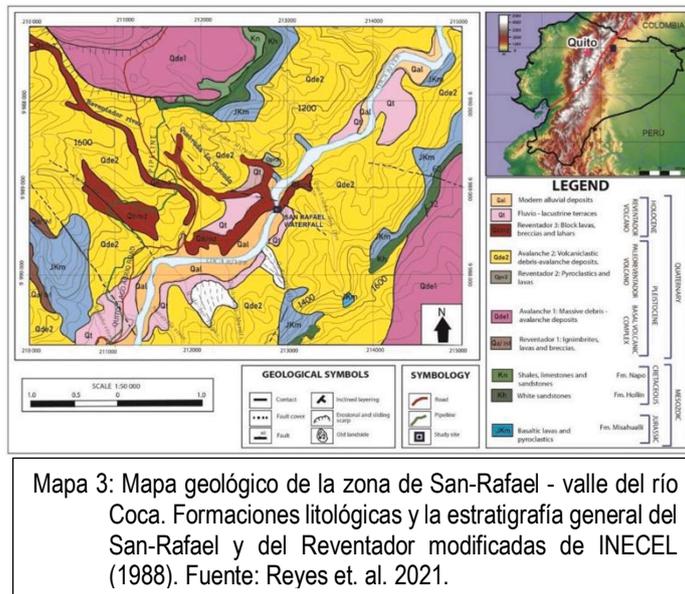
⁵² INVESTIGACIÓN MUESTRA EROSIÓN EN CAUCE DEL RÍO COCA EN EL SECTOR DE SAN RAFAEL. sf. <https://www.epn.edu.ec/investigacion-muestra-erosion-en-cauce-del-rio-coca-en-el-sector-de-san-rafael/>

⁵³ JUICIO NO. 22281202000201. SALA MULTICOMPETENTE DE LA CORTE PROVINCIAL DE JUSTICIA DE ORELLANA. <https://ddhhecuador.org/sites/default/files/documentos/2021-01/escrito%20prueba.pdf>
<https://www.derechosdelanaturaleza.org.ec/wp-content/uploads/2021/04/1.1.-CASO-SAN-RAFAEL-SEGUNDA-INSTANCIA.pdf>

⁵⁴ Bolaños Fúel, F. y Irbin Shinguano Loaiza. ¿2013?. Levantamiento de una línea de Base de los Pasivos Hidrocarburíferos que se encuentran en los Poblado de San Rosa y El Reventador. <http://repositorio.espe.edu.ec/xmlui/bitstream/handle/21000/7644/AC-GMA-ESPE-047593.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

ser movido por las corrientes. Los embalses también pueden moderar los picos de crecida aguas abajo, disminuir los caudales (Caso de la represa para el PHCCS), contribuyendo a reducir los potenciales efectos de las aguas hambrientas.⁵⁵

6.1.2 Origen Natural



La hipótesis que se propone en este reporte es que la desaparición de la cascada tiene origen natural, para ello se enfoca a analizar el comportamiento de la cascada a lo largo de los años tanto en su cambio geomorfológico (mediante análisis de fotografías), la estructura geológica de lo que fue la cascada y en las evidencias que se observan en imágenes satelitales tales como Planet, Sentinel 2 o Landsat.

Geológicamente la cascada se origina por un flujo de

lava andesítico - basáltico que descendió del volcán El Reventador, se estima hace más de unos 8.000 años -si bien existen planteamientos en el sentido que pudo haber acontecido hace menos de 4.000 años (B. Beate com. pers.). Este flujo se depositó en el paleo valle que drenaba el río Coca. Este valle, que se encontraba a unos 2 km hacia el norte de su posición actual, fue rellenado por brechas y material volcánico que se generaron en el complejo Reventador Basal entre los que se encuentran los materiales que corresponden a la brecha y a la avalancha 1 (AVL1) esta última depositada sobre la brecha; la mayor parte de estos materiales fueron erosionados, a la vez que se profundizó el valle; los materiales remanes fueron luego cubiertos por la avalancha (AVL2) que se originó con durante el paleo Reventador. La AVL2 rellenó el cañón y el río comenzó erosionar estos materiales hasta que alcanzó la brecha. Durante este episodio, se produjo el flujo de la que dio origen a la cascada de San Rafael el mismo que se depositó, en la margen izquierda del río sobre la brecha así como sobre la AVL2. La AVL2, presente aguas debajo de la cascada, se fue erosionando como también lo fue el frente del flujo de lava (Ilustración No. 2). Aguas arriba del flujo de lava se retenía los materiales re-trabajados de la AVL2, sedimentos lacustres, lahares, materiales asociados con la actividad volcánica, etc. La brecha, cuando desapareció la cascada, yacía sobre rocas de la formación Misahuallí.

⁵⁵ KONDOLF M. 1997. Hungry Water: Effects of Dams and Gravel Mining on River Channels. Environmental Management Vol. 21, No. 4, pp. 533–551

El proceso de desaparición de la cascada se inició desde el mismo momento que está se activó, una vez que la aguas del río Coca superaron el dique que formó el flujo de lava al depositarse en el paleo valle. Este flujo discurrió sobre las brechas del Complejo Volcánico Basal (Foto No. 3), así como sobre la avalancha (AVL2). Estos materiales, en especial los de la avalancha, situados en la base del flujo, fueron erosionándose; como también se erosionaba el frente del flujo de lava, el mismo que fue retrocediendo. La erosión de la AVL2 dejó como evidencia la cueva que se observaba en la base de las cascada (Fotos No. 19 – 26 y 28), este proceso erosivo fue dinamizado por las aguas subterráneas, en especial las que percolaban por el contacto entre los materiales (avalanchas, sedimentos, depósitos aluviales, lahares, brechas) contenidos por el dique que formó el flujo de lava (Ilustración No. 2).



Foto 3: Flujo de lava que formó la cascada de San Rafael asentada sobre brechas del Reventador Basal (Foto tomada de video Boofsessions).

PROCESO EROSIVO CASCADA SAN RAFAEL

Alfredo Carrasco Valdivieso 02 2022

1.- AVL2 se deposita sobre Brechas Reventador Basal (BRB). Flujo de lava lo hace sobre AVL2 y BRB. SE forma el dique que contiene AVL2 que es contemporánea a Formación del Flujo lava (entre 8.000 y 12.000 años), así como el material retrabajado AVL2 y otros depósitos (QAL). La cascada que se forma erosiona frente del flujo; aguas subterráneas erosionan BRB y AVL2 de base de la cascada.

2.- Cascada provoca retroceso frente del flujo de lava. Aguas subterráneas continúan proceso erosivo de BRB y AVL2. Aguas se percolan a través del contacto de los materiales retenidos (QAL y AVL2) y el flujo de lava.

3.- Proceso erosivo modifica frente de la cascada aguas abajo. Continúa erosión de BRB y AVL 2 por acción de las aguas subterráneas, ampliando y profundizando la cueva de la base de la cascada.

4.- Aguas subterráneas fluyen en la base de la cascada por la cueva y el contacto lava / AVL 2 BRB

Ilustración 2: Emplazamiento flujo de lava. (1), Proceso Erosivo (2 y 3), Aguas subterráneas (4).

La cascada, según la secuencia de fotos que van desde 1945 hasta el 2019, se fue modificando de manera significativa (Anexo 1 corresponde a fotografías que ilustran el Cambio Morfológico de la Cascada San Rafael entre 1945 y 2022). La foto tomada por Heinrich Goldschmid en 1945 (Anexo 1: Foto 14), a quién se atribuye que fue el primero en fotografiar la cascada, comparada con la fotografía de Simón Bustamante (1970) (Foto 16), en la parte destacada en rojo, se observa que, en ese lapso de tiempo, ha ocurrido un desprendimiento que contribuyó a que se “amplíe” el “canal” por el que finamente se precipita el agua, así como retroceda unos metros el salto – en la foto de Goldschmid se observa una especie de “mesa” en la margen derecha que no es vivible ni en la foto de Schauenberg (1968) (Anexo 1: Foto 15) ni

está presente en la de Bustamante (Anexo 1: Foto 16).

Simón Bustamante, en 1970⁵⁶, en su descripción de la cascada de San Rafael, indica que la bocana, por donde ingresa el agua del río Coca, tiene unos 20m de ancho la que está flanqueada por dos espolones de roca, el del sector occidental (margen izquierdo del río) cubierto de selva, mientras que el oriental (margen derecha) es roca visible que actúa como represa natural la que, en épocas de grandes crecientes, se transforman en vertedero. Describe 3 saltos, el primero de unos 10 m de alto a cuyo pie se encuentra una poza algo arredondeada que permite la formación de una especie de laguna; el segundo de unos 30 m de alto, girado al occidente con respecto al primero, guiado por paredes de roca al occidente y por un espolón al oriente, se precipita sobre una especie de escalón rocoso situado en medio de la escarpa, el agua también se incrusta en oquedades laterales de roca, a manera de cuevas; y, el tercer salto, el mayor, más espectacular y hermoso, de unos 100 m de altura, se precipita desde un gran farallón “cuyas bases parecen disponerse en forma de cuevas”. Según Bustamante, la cascada en su conjunto tendría unos 140 m de alto.



Foto 4: Caudal del río Coca en la cascada de San Rafael. Los caudales habrían superado los 5.000m³. (Foto: @jucavillfte, 12 04 2020).

Los cambios morfológicos y el retroceso de la cascada se hacen más evidentes entre 1987 (Anexo 1: Foto No. 18, tomada pocos días después del sismo de marzo de ese año) y el 2015 (Anexo 1: Foto No. 25 de Eric Mohl - San Rafael 2014 – 2015). Las fotos que Mohl compara (2014 – 2015) sin duda son las más ilustrativas del retroceso de la cascada. Entre 1945 y el 2014, en todas las fotografías (Anexo.1) es evidente el doble salto, salvo lo expresado por S. Bustamante; mientras en la de septiembre del 2015 se observa un solo salto, así como el frente de flujo de lava sin la vegetación que solía exhibir. Se estima que la cascada retrocedió entre unos

10m y 15m; este retroceso habría acontecido en mayo del 2015 (Tw: @jucavillfte, 12 04 2020). Sin duda que los volúmenes de agua que transporta el río habrían jugado un papel determinante en el retroceso. En febrero del 2013 se observaron caudales de hasta 5.000 m³/s (Tw: @jucavillfte, 12 04 2020) que desbordaron la cascada (Foto No. 4).

Simón Bustamante en su informe de 1970 describe un comportamiento similar en épocas de grandes crecidas, además señala que durante su permanencia en la zona soportaron un período de lluvias de gran duración e intensidad que se prolongó más de una semana, de ese período destaca los siguientes volúmenes: 2.000 m³/s (3 enero 1970), 4.000 m³/s (4 enero 1970), 12.000 m³/s (noche del 4 enero 1970), 15.000 m³/s (7 de enero 1970) y 450 m³/s (10 de enero 1970)⁵⁷. La cascada mantiene la configuración geo- morfológica con la presencia de un solo salto desde mediados del 2015 hasta el 2 de febrero del 2020 cuando finalmente desaparece esta singularidad geomorfológica.

El análisis multitemporal (2013 – 2019) de las imágenes satelitales (Google Earth, Landsat, Sentinel 2, Planet) muestran un comportamiento singular en el sitio en el que se produjo el sumidero. En las imágenes satelitales (Tabla 1) se evidencia que algo inusual estaba ocurriendo en el sector. En la imagen Sentinel 2 (Tabla 1: Imagen 1) del 19 de octubre del 2018 se observa

⁵⁶ Bustamante S. 1970. Proyecto Quijos – Coca: Informe de Exploración. Boletín No. 12 Mayo 1970. AIDI. (24 pg.)

⁵⁷ Bustamante S. 1970. Proyecto Quijos – Coca. AIDI Boletín No. 12 – Mayo 1970. Quito

una ligera depresión – ver círculo rojo- en la vegetación, la que es más evidente en la Imagen 2 (Tabla 1) del 01 de diciembre de ese año. Estas depresiones ocurren en el sitio en el que posteriormente se visibilizaría el sumidero que dio origen a la desaparición de la cascada. En la Imagen 3 de Planet del 15 de febrero del 2019 (Tabla 1), la depresión es más evidente. En la del 27 de mayo del 2019 -en el círculo blanco – la depresión tiene una configuración circular que tiene un diámetro aproximado de 6 m (Imagen 4). En la Imagen 5, del 25 de junio del 2019, y en la del 3 de julio de ese año (Imagen 6) la depresión está más acentuada. El 18 de agosto del 2019 (Imagen 7) la configuración del sumidero es más evidente, el que ya alcanza unos 10 m de diámetro (aprox.). Esos incipientes hundimientos o presencia de un sumidero en formación, que se enmascaran en la vegetación, en realidad son evidencia de que el proceso de desaparición de la cascada se originó en la base de la misma. La cueva (Anexo 1: Foto No. 26) se fue profundizando con la ayuda de las aguas subterráneas que actuaban como un importante agente erosivo de los materiales que rellenaban el valle aguas arriba del flujo de lava y sobre alguno de los cuales (BRB y AVL2) se depositó el flujo de lava.

El 13 de septiembre del 2019, Patricio Ramón, luego del rutinario monitoreo anual del volcán Reventador, fotografía la cascada (Anexo 1: Foto 25). En dicha foto se observa una especie de “nube” a un costado del flujo de lava, en la margen izquierda del río Coca, aguas arriba. Aquella “nube” corresponde, en realidad, al agua atomizada que se produce debido al impacto del caudal hídrico al precipitarse y chocar con el fondo de la cascada; esta agua atomizada es arrastrada por la chimenea que, a esa época, ya se había formado en el contacto entre los sedimentos y el flujo de lava. Observando con atención la foto referida, se observa que ya había formado un incipiente canal (en el círculo rojo) que conectaba al río con el sumidero, este aporte hídrico contribuyó para que se acelere la erosión de los materiales con la consiguiente ampliación del sumidero. Al 19 de septiembre del 2019, el socavón o sumidero ya había alcanzado un diámetro aproximado de entre 30 y 35 m y ya mantenía una conexión con el río Coca (Tabla 1: Imagen 8). A octubre del 2019 (Tabla 1: Imagen 9) el diámetro del sumidero había alcanzado unos 45 m. Al 28 de enero (Tabla 1: Imagen 10) el sumidero se había ampliado lo suficiente como para permitir, en los siguientes días (presumiblemente el 1 de febrero), que los caudales del río Coca se canalicen finalmente por ese sumidero. Lo que realmente se observa en los videos del 2 de febrero es el desprendimiento del techo de la cueva, consecuencia de la inestabilidad que ya se provocó por el cambio de flujo del agua.

En la zona de San-Rafael, en el noreste de Ecuador, la desaparición de la cascada no fue “inesperada”, fue desencadenada por el colapso del techo de un sumidero que se formó por la erosión interna de los materiales sobre los que se asentaba el flujo de lava y luego ascendió a lo largo del contacto entre estos materiales y el flujo de lava. La cueva que se constituyó en el interior de los materiales, “similar” a lo que se conoce como terrenos karstificados que suelen ser socavados por la disolución del subsuelo, el drenaje interno, el flujo de agua subterránea o cualquier otro proceso hidrotermal (Frumkin et al., 2015; Gutiérrez et al., 2008; Del Prete et al., 2010; Baryakh y Fedoseev, 2011), a pesar de que aquí no existían terrenos calcáreos, se produjo un proceso similar, pseudokárstico, en los depósitos volcanoclásticos sueltos por acción, en este caso, de las aguas subterráneas.

ANÁLISIS DEL PROCESO EROSIVO OCASIONADO POR LA DESAPARICIÓN DE LA CASCADA DE SAN RAFAEL – RÍO COCA: ORIGEN – IMPACTOS: PRODUCTO 1

Tabla 1: Imágenes satelitales del proceso de cambio superficial aguas arriba de la cascada.



Imagen 1: Sentinel-2 19 10 2018. Incipiente depresión en la cobertura vegetal.



Imagen 2: Planet NICFI (mosaico) 01 12 2018. Incipiente depresión en la cobertura vegetal.



Imagen 3: Planet 15 02 2019 depresión en cobertura vegetal (círculo rojo).

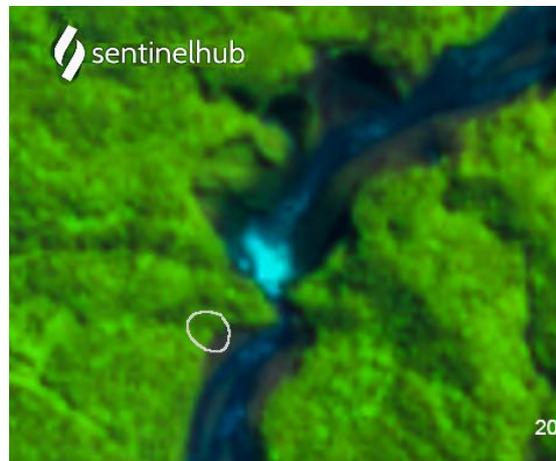


Imagen 4: Sentinel 27 05 2019, depresión en cobertura vegetal (círculo blanco)



Imagen 5: Sentinel 25 06 2019, depresión en cobertura vegetal (círculo rojo)



Imagen 6: Sentinel 03 07 2019, depresión en cobertura vegetal (círculo rojo)



Imagen 7: Imagen Planet 19 08 2019, depresión en la cobertura vegetal (círculo rojo).

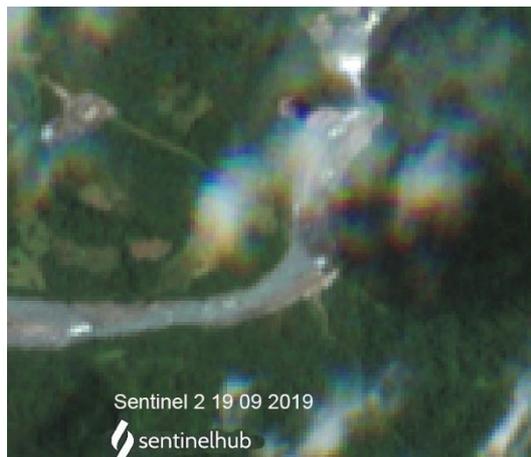


Imagen 8: Sentinel 2 19 09 2019. Sumidero



Imagen 9: Planet octubre 2019.



Imagen 10: Planet 28 01 2020

ANÁLISIS DEL PROCESO EROSIVO OCASIONADO POR LA DESAPARICIÓN DE LA CASCADA DE SAN RAFAEL – RÍO COCA: ORIGEN – IMPACTOS: PRODUCTO 1

La evidencia muestra que el evento no fue repentino, como tampoco inesperado. Imágenes satelitales muestran que entre desde el 2018 ya existía un comportamiento diferenciado en la margen izquierda, aguas arriba de la cascada, que se evidencia en septiembre de ese año con un sumidero de más de 60 metros de diámetro en ese sector, en el contacto del arco de lava. Un socavón de este tipo se da cuando el agua abre paso debajo de la superficie, se infiltra, llevándose poco a poco el material allí depositado y generando el hundimiento. Estas

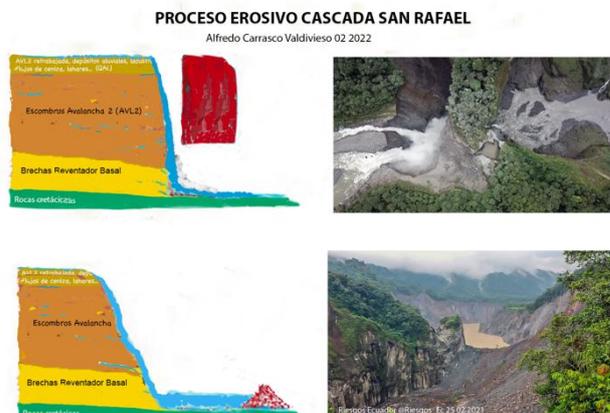


Ilustración 3: Proceso Erosivo – Desaparición de la Cascada y el Arco.

infiltraciones, sin duda, se magnificaron con la continua pérdida de material en la base de lo que sería el sumidero, el proceso culminaría el 2 de febrero, cuando el terreno cedió por completo desviando el cauce del río. Se pudiese interpretar que no se estudió apropiadamente el área como tampoco se realizó el debido seguimiento una vez que desapareció la cascada para evaluar las consecuencias que de este procesos se derivarían.

6.1.3 Aguas Subterráneas y su papel en la Erosión de la Base



Foto 5: Margen izquierda del río Coca, a unos 250m aguas debajo de la cascada. Vertientes que surgen en el contacto de materiales volcánicos / coluviales / aluviales y la formación Misahuallí?. (Foto Manuel Pallares 31 01 2021).

manantial 250m aguas abajo de la cascada, margen izquierda). El volumen de agua subterránea que se moviliza en la zona es importante, el que es alimentado por la infiltración que se produce, principalmente, en esta caso, en las pendientes del complejo volcánico el Reventador, como también de la infiltración que se ocasiona por la carga hídrica del río y el mantenimiento del equilibrio hídrico subterráneo. Estas aguas o se emplazaban en acuíferos o surgía a superficie, como se muestra en la foto, en este caso en el contacto entre materiales volcánicos y rocas de la formación Misahuallí. Vertientes similares a la que se observa en la fotografía estaban presentes en la cueva, al pie de la cascada.

Las aguas de las vertientes presentes en la cueva se originaron de los flujos de aguas subterráneas arriba descritos, pero además por la infiltración de agua que acontecía a través del contacto entre los depósitos acumulados aguas arriba del flujo de lava y el flujo. En esta zona el río Coca formaba una especie de represa temporal en la que se acumulaba agua previo a precipitarse. La infiltración del agua a través del contacto, tenía un flujo permanente que

finalmente era evacuado al pie de la cascada en el contacto entre las rocas de avalancha y el flujo de lava.

En el proceso de erosión de la base actuaron dos fuerzas impulsoras, la primera asociada con la caída del agua que provocaba el retroceso del frente de lava y, además, contribuía a erosionar los escombros sobre los que asentaba el flujo, y la segunda las aguas subterráneas.

Las aguas subterráneas jugaron un papel importante en el proceso erosivo, ya que contribuyeron a acelerar la erosión de los materiales (brecha, avalancha) sobre los que se asentaba el flujo de lava. Es importante tener presente que la penetración del agua en la tierra, sea ya a través de la porosidad de los materiales o por las grietas de las rocas, favorece procesos erosivos (p.e. cuevas kársticas); en la medida que la erosión por la acción de las aguas subterráneas continua, el techo de una caverna puede colapsar o derrumbar, cuando aquello acontece, con frecuencia se evidencia en superficie un sumidero o depresión. Conviene señalar que los sumideros, no necesariamente asociados con sistemas kársticos, también se los observa en ambientes volcánicos: p.e. Los Gemelos, isla Santa Cruz, Galápagos, resultado del colapso del techo de una cámara magmática, estos procesos son conocidos como pseudokársticos.

Los sumideros creados por el colapso de grandes cavidades que se desarrollan en los depósitos volcánicos cuaternarios relativamente poco consolidados, desmenuzables, suelen tener la suficiente cohesión como para que se desarrollen vacíos subterráneos dentro de ellos. A este proceso se lo conoce como " tubería de suelo ", primero se generan vacíos subterráneos, ya que el agua fluye a través de estos depósitos volcánicos y lavaba mecánicamente los materiales volcánicos / sedimentos finos, los erosiona progresivamente al eliminar los materiales más gruesos. Eventualmente, estos vacíos subterráneos se vuelven lo suficientemente grandes como para que sus techos se derrumben y generen los agujeros que se visibilizan en superficie.⁵⁸



Foto 6: Cueva al pie de la Cascada de San Rafael. Nótese la presencia de afloramientos de agua subterránea (vertientes), además la profundidad de la cueva (Foto tomada de un video aficionado del 20 02 2018).

La estructura y con ello la formación de sumideros. La filtración de agua remueve los materiales comenzando desde el punto de salida de la filtración, a la vez que avanza tanto horizontal como verticalmente -estos dos procesos se dieron en la Cascada de San Rafael-

En este proceso es importante considerar los volúmenes de agua que se infiltran, sí como la velocidad de filtración, cuando es lo suficientemente grande puede ocurrir erosión debido al arrastre de fricción que se ejerce sobre las partículas del suelo. La filtración vertical hacia arriba se vuelve peligrosa en el lado corriente abajo de las pantallas de contención, así como a lo que se encuentre debajo de la base de una presa o dique. La erosión del suelo, conocida como "tubería de suelo", puede provocar la falla de

⁵⁸ Sumidero – Sinkhole. Wikipedia, la enciclopedia libre. https://no-regime.com/ru-es/wiki/Sinkhole#Piping_pseudokarst

En el caso de la cascada de San Rafael, la desaparición es atribuible a un proceso pseudokárstico⁵⁹. El sumidero que se formó no fue consecuencia de la disolución de piedra caliza, dolomita, mármol o cualquier otra roca o cemento soluble en agua, típico de zonas kársticas. El que se formó en la cascada se desarrolló en los depósitos volcánicos (brechas, avalanchas, cenizas volcánicas), materiales aluviales, lahares, poco o nada consolidados, desmenuzables, retenidos aguas arriba del flujo de lava; estos materiales tienen relativa cohesión que permite la filtración del agua y con ello el desarrollo de cavidades subterráneas. En el caso de San Rafael, este proceso primero formó la cueva que se encontraba al pie de la cascada a la vez que por la acción de la caída del agua retrocedía el frente de la misma (Ver Foto No. 2, la de Rolf Blomberg de la cascada Agoyán, allí se observa una cueva, en la margen izquierda del río: las lavas se asientan sobre materiales aluviales, coluviales formando una cueva resultado de la erosión diferenciada). Las aguas infiltradas fluían a través de los materiales retenidos, lavaban mecánicamente los materiales finos de ellos, luego, progresivamente, erosionaba los materiales más gruesos. Este proceso, una vez que superó, hacia atrás, el límite del contacto entre el flujo de lava y los materiales retenidos – se estima que el flujo de lava tenía unos 60m de ancho-, inició un proceso erosivo ascendente que fue produciendo lo que con el paso de los años se constituiría en el sumidero por el que finalmente se desvió el río Coca, ocasionando la desaparición de la cascada.

PROCESO EROSIVO CASCADA SAN RAFAEL

Alfredo Carrasco Valdivieso 02 2022



5.- Aguas que percolan por el contacto entre flujo de lava y depósitos (QAL, AVL2) erosionan verticalmente los depósitos iniciando la formación del sumidero (proceso pseudokárstico).



6.- El sumidero se evidencia en superficie. Foto de Patricio Ramón de 13 09 2019 muestra que agua vaporizada es arrastrada por el efecto chimenea del sumidero.



Ilustración 4: Inicio de sumidero por acción pseudokárstica (5). Sumidero se forma a lo largo del contacto del flujo con materiales QAL y AVL 2.

El túnel vertical subterráneo se volvió lo suficientemente grande como para que su techo colapsara y creara el agujero que se observó en superficie, en la imagen Sentinel / Planet de septiembre del 2019. Los sumideros pueden formarse de manera gradual o repentina, en este

⁵⁹ El término pseudokarst ha sido usado también para la descripción del lapiaz, campos de torres y formas relacionadas en cuarcita y arenisca; sin embargo, las formas tipo lapiaz no deben ser consideradas formas kársticas, bien se trate de rocas carbonáticas o silíceas (MARTINI, 1982); ellas son formas de superficie que pueden participar o no en el desarrollo de la topografía kárstica; el karst se caracteriza esencialmente por la desaparición de la morfología asociada al drenaje de superficie. Más aún, las formas tipo lapiaz pueden ocurrir en prácticamente cualquier roca, incluso basalto o granito (HOLMES, 1965; URBANI & SZCZERBAN, 1975). De igual modo, formas de disolución pueden presentarse en todo tipo de roca, sean estas más o menos solubles (GALAN, 1991).

caso habría tomado varios ¿meses o años? el proceso de formación. El sumidero que se formó en San Rafael no fue evidente por dos motivos, 1.- No existía un monitoreo regular del área (zona poco visitada) -si bien existe un reporte de un campesino de la localidad que informó que observó el socavón (sumidero) antes de que desaparezca la cascada; además existe una fotografía del 13 de septiembre del 2019 (Anexo 1: Foto 25) en el que se observa una “nube” sobre el sumidero que en realidad corresponde al agua vaporizada que era absorbida por el conducto que ya se había formado -, 2.- no existía un programa regular que vigile el comportamiento de los ríos.

En un análisis *expost* de las imágenes satelitales (de inicios del 2019), se observa un rasgo singular que con los meses se fue configurando como una “depresión” circular en el entorno de la vegetación, en el sitio donde finalmente se visibilizó el sumidero; no fue un evento dramático, durante meses (años?) la superficie de la tierra permaneció intacta hasta cuando no existió el apoyo suficiente para sostener los materiales que estaban encima del túnel o chimenea, debido a que el agua infiltrada que descendía reducía la cohesión del suelo ablandándolo y provocando su desprendimiento. Cuando ese soporte estructural falló, se produjo el colapso que se evidenció en la superficie justo a un costado del flujo de lava, aguas arriba, a unos 100m de la margen izquierda del río. El agua que fluía tanto de los niveles freáticos, así como las infiltradas de las pendientes del volcán Reventador y que drenaban subterráneamente hacia la zona de la cascada, la que es infiltraba a través del contacto materiales retenidos – flujo de lava, formaban vertientes que evitaban que se acumulen materiales en la base de la cueva facilitando así la que continuidad del proceso de erosión subterránea que derivó en el colapso de la cascada.

6.2 Efectos de Proceso Erosivo

6.2.1 Transporte de Sedimentos



Imagen 11: Planet. Sobre posición de imágenes que ilustran la magnitud del proceso erosivo aguas arriba de lo que fue la cascada (esquina superior derecha) y la confluencia del río Malo en el Coca. En blanco el cauce del río Coca en al 01 diciembre del 2019 (aprox. 126 ha.), en oscuro el área erosionada al 01 junio del 2022 (aprox. 382 ha.).

El proceso erosivo resultado de la desaparición de la cascada de San Rafael, ha removido entre 115 y 155 millones de m³ de sedimentos que han sido transportados por el río Coca al 01 06 2022; para esta cálculo se estimó la superficie del área afectada cuyo valor aproximado es de 382 ha.⁶⁰, mientras que la profundidad promedio de erosión se estimó entre 30m y 40m⁶¹. Un estudio de la Universidad Central señala que al 25 de junio del 2021 se habrían movilizado 150 millones metros cúbicos de sedimentos⁶², mientras que CELEC en la charla del 6 de agosto 2021 señaló que 200 millones de metros cúbicos se habrían

⁶⁰ Para la estimación de las hectáreas se utilizó la función Análisis de Photoshop a una imagen Planet del 01 06 2022. Por la escala y resolución de la imagen satelital, se realizaron varios corridas con el propósito de minimizar los errores.

⁶¹ Para el cálculo de los valores de profundidad, se realizó un promedio (aproximado) en función de la pendiente, la longitud recorrida (10 km) y la pendiente de los taludes consecuencia del proceso erosivo.

⁶² Casa de máquinas de Coca-Codo Sinclair en riesgo de inundación por erosión regresiva. Lucía Vásconez. El Comercio 25 junio 2021. <https://www.elcomercio.com/actualidad/negocios/casa-maquinas-coca-codo-riesgo-inundacion-erosion.html>

removido.

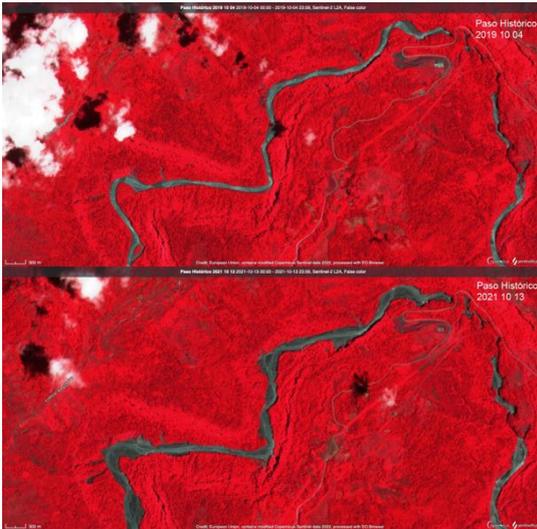


Imagen 12: Sentinel IR 2 imágenes que comparan el comportamiento del río Coca en el 04 10 2019 con el del 13 10 2021 en el tramo que corresponde a unos 12 km aguas arriba del Paso Histórico y unos 4.0 km aguas abajo del Paso.

El volumen de materiales transportados ha generado profundos cambios en el curso bajo del río Coca. En la Imagen 12 se puede observar los efectos causados aguas debajo de lo que fue la cascada, evidencia de ampliación del cauce y acumulación de sedimentos en el lecho del río dejando amplias orillas / terrazas, además generando procesos erosivos en las márgenes. La acumulación de sedimentos entre lo que fue la cascada y el Paso Histórico (aprox. 22 Km), modificó el lecho y curso del río. El cauce del río, en este tramo, tenía un ancho promedio de unos 130 m, actualmente está en el orden de los 250 m en promedio, observándose en algunos sectores anchos de hasta 450m. El cauce, en este segmento, se habría elevado entre 10m y 12m (estimaciones gruesas), con ello se han formado terrazas y ampliado orillas; la alteración del cauce ha ocasionado varios deslizamientos, en especial en la margen izquierda; en este sector se estima que el río ocupa una superficie de 540 ha.

El volumen de sedimentos depositados en este trayecto se estima entre 55 y 65 millones de metros cúbicos. Los volúmenes estimados para el segmento que va desde el Paso Histórico hasta el punto en donde el río Coca se ensancha en la planicie amazónica (aprox. 38 Km de longitud) se estima entre 35 y 45 millones de metros cúbicos (ancho promedio del río, en este segmento, 190m; espesor estimado entre 3m y 4m; superficie que ocupa el cauce del río 1110 ha). En este tramo -desde la cascada hasta el inicio de la planicie amazónica – se habrían depositado entre 85 y 110 millones de metros cúbicos de sedimentos.

A 18 km del Puente Histórico, aguas abajo, se encuentra el canal de restitución del PHCCS que canaliza las aguas turbinadas nuevamente hacia el río Coca. En este punto se estima que se los sedimentos depositados en este tramo alcanzarían los 3m de espesor, situación que provocaría una potencial inundación de la casa de máquinas. Este riesgo fue reconocido por el Gerente de CELEC, Gonzalo Uquillas, en entrevista al programa Visión 360 presentado el 24 de abril del 2022⁶³, reconoció que cuando se



Foto 7: Caudal río Coca (6.000 m3/s) supera barrera de entre 6m - 8m de alto del canal de restitución que canaliza las aguas turbinadas del PHCCS. Se estima que el espesor de sedimentos depositados en este tramo del río supera los 3m. Fuente foto: Ponencia de Jorge Sevilla).

⁶³ EL HAMBRE DE UN RIO YOUTUBE - VISIÓN 360 - 8VA TEMPORADA. <https://www.youtube.com/watch?v=wLy8AmEN77s>

presente una crecida del río existiría la posibilidad de que la sedimentación afecte la normal descarga de la central, y, en caso de que fallen las compuertas que controlan la salida o ingreso de aguas pudiese, eventualmente, inundarse la casa de máquinas ya que los niveles del río quedan por encima del nivel de descarga de la casa de máquinas (Foto No. 7). Esta observación es importante desde dos puntos de vista: 1) los sedimentos que se han depositado en este tramo superarían los 3m de espesor y, 2) que la casa de máquinas está en riesgo. Estas observaciones, como se ha señalado de manera recurrente en otros temas, fue oportunamente expresadas por profesionales, entre ellos el ingeniero Jorge Sevilla.

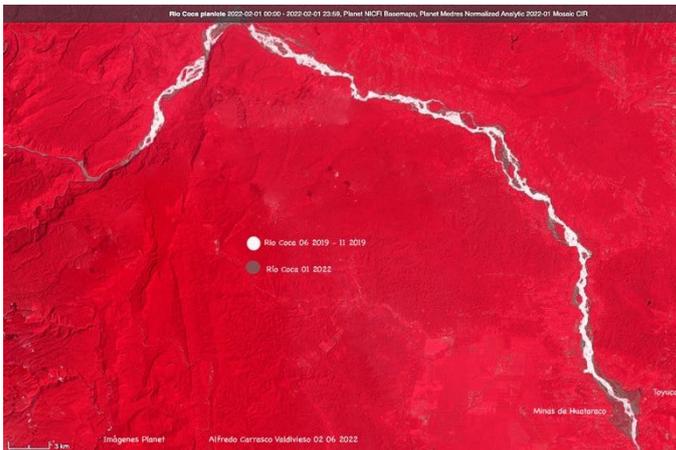


Imagen 13: Curso del río Coca en planicie amazónica. 2019 (blanco) 01 2022 (café pardo).

Debido a la carga de sedimentos que movilizó el río Coca en la planicie amazónica (aproximadamente unos 36 millones de metros cúbicos), varios sectores de esta planicie aluvial que influencia el río exhiben notables cambios, en algunos lugares el río, en especial en el Coca, ha retomado antiguos cauces (Imagen 13)-sobre posición de imágenes Planet del 06/11 2019 sobre imagen del 01 2022-.

En la Imagen 14 se observa el comportamiento del río en el sector de Las Minas de Huataraco (margen derecha) en la parroquia San José de Guayusa y Comunidad de Toyuca (margen izquierda) parroquia San Sebastián de Coca. En la Imagen 13, en blanco, corresponde al cauce del río Coca el 10 12 2019, unos dos meses antes de la desaparición de la cascada de San Rafael, mientras que la segunda es del 28 01 2022. El comportamiento del río sufrió un cambio radical. Debido al transporte y acumulación de sedimentos en los cauces prevalecientes en el 2019, las aguas activaron antiguos cauces irrumpiendo amplias áreas que forman parte de las llanuras de inundación, así como erosionando las orillas. Toyuca y las Minas de Huataraco están fuertemente afectadas. Es menester tener presente que las lluvias contribuyeron a que se acentúe el impacto por el aumento de los caudales durante la temporada de lluvias.

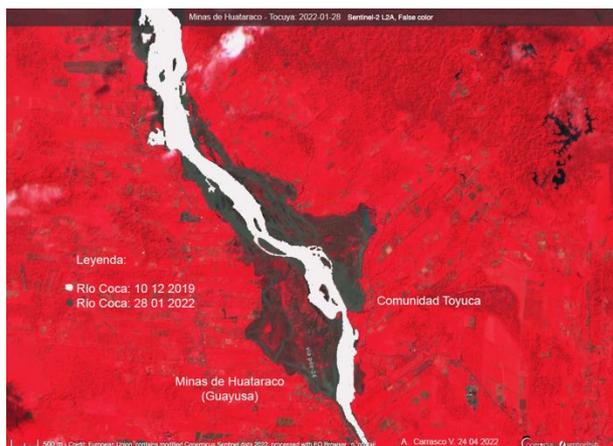


Imagen 14: Imágenes Sentinel IR. Comportamiento del río Coca en el sector de Minas de Huataraco (margen derecha) y Toyuca (margen izquierda). En blanco el cauce del río al 10 12 2019; en gris el comportamiento al 28 01 2022

En la zona que se inundó, existían viviendas, así como plantaciones de cacao, entre otros cultivos. El comportamiento del río, la erosión de las orillas, en la población del Coca, ha puesto en riesgo la planta de tratamiento de agua. La alta carga de sedimentos, además ha incidido negativamente en la actividad pesquera, cómo también ha complicado la navegación tanto en el río Napo y en el Coca.

En San Sebastián del Coca las bases del puente que conecta esa localidad con Francisco de Orellana están afectadas por la erosión; para mitigar el potencial impacto están protegiendo las bases con un sistema de enrocado. En la Imagen 14, en el extremo superior izquierdo se

encuentra el puente citado, aguas abajo del Río Coca, se sobre puso (blanco) el cauce / comportamiento del río al 26 09 2019 sobre la imagen Sentinel del 08 01 2022. Es notorio el comportamiento del río hasta la desembocadura con el río Coca, las zonas grises evidencian el comportamiento del río, tanto el Coca como el Napo, modificaron el cauce en algunas partes provocando inundaciones o erosión de las orillas, este último evento es más evidente en la margen izquierda de los dos ríos.

En este segmento (Río Coca), los mayores impactos se observan en las orillas de del poblado del Coca, se estima que, en esta localidad de 45 000 habitantes, ubicada entre los ríos Payamino y la confluencia del Napo y el Coca, según la municipalidad, la afectación por los sedimentos y la erosión supera los USD 140 millones. La dirección de Riesgos del Municipio de Coca informó que se han registrado problemas en barrios y comunidades del cantón. La carga de sedimentos que transporta el río está colmatando el lecho del río, el nivel fluvial va subiendo y la cota de agua, señalan, ha superado los niveles históricos, y con ello se está provocando erosión e inundaciones. Se han perdido terrenos, sembríos y viviendas, así como a impactado en la actividad pesquera. Según CELEC, la acumulación de sedimentos, en este tramo del río, alcanza un metro en el lecho del río.⁶⁴ En la Imagen 15, en el sector que corresponde al río Coca, en el período comprendido entre el 26 09 2019 y el 08 01 2022, en las dos márgenes se evidencia que el río ha erosionado las orillas o está recorriendo por antiguos cauces.



Imagen 15: Imágenes Sentinel FC. Tramo del Río Coca (Puente de San Sebastián del Coca – Desembocadura en el Río Napo / Desembocadura R.C. - R.N hasta Amarun Mesa. En blanco cauce de los ríos al 26 09 2019 – en gris el cauce de los ríos al 08 01 2022.

En el caso del río Napo, en el sector analizado, no muestra una mayor alteración entre el 26 de setiembre 2019 y el 08 de enero del 2022, lo que sí acontece son cambios en los bancos de arena frecuentes en este río, con excepción del sector de Amarun Mesa en donde la erosión de las orillas ha afectado a una importante superficie (ver análisis más adelante). En la ruta Coca – Pompeya, al navegar por el río Napo, en particular, en la margen izquierda, se observó, en algunos lugares, desprendimientos de las orillas; evidencia de erosión debido a las corrientes que pueden estar asociadas a la época de lluvias o a una incidencia de una mayor carga de sedimentos que arrastra el río los que, al acumularse, modifican el curso de los cauces y, consecuentemente, el flujo del río. A criterio del motorista los mayores cambios se observan en los bancos de arena.

⁶⁴ Pérdidas para familias y daños millonarios en El Coca por erosión. Lucía Vásconez. El Comercio. 20 de junio de 2021. <https://www.elcomercio.com/actualidad/negocios/perdidas-familias-erosion-rio-coca.html>



Imagen 16: Imágenes Sentinel FC. Amarun Mesa sobre puestas: 28 07 2018 (amarillo) 04 01 2020 (blanco) y 02 06 2022 (gris oscuro). Resalta erosión en especial en margen izquierda ríos Napo y Coca.

(28 meses), sin lugar a dudas están relacionados con la carga de sedimentos y la época de lluvia. Vale destacar que los pobladores kichwa de Amarun Mesa atribuyen el retroceso de las orillas a lo que acontece en el sector de El Reventador; reconocen, sin embargo, que este comportamiento es frecuente en el río -algunos señalan que las orillas habrían retrocedido más de 400 metros en los pasados 10 años-, por lo que los habitantes se vieron obligados a replegarse conforme las orillas fueron siendo erosionadas. Un análisis de la imágenes Google Earth (Imagen 17) entre 1985 y el 2018, muestran el comportamiento de los ríos Coca y Napo en este sector. En ese período el río Napo, en el sector de Amarun Mesa, afectó a 260 ha., en esta superficie consta el sitio en el que se encontraba la comunidad en el 2003, como también fueron erosionadas 55,5 ha. en la margen derecha en el sector de los militares; en contraste, por el cambio del curso del río Napo se añadieron 71 ha. en la margen izquierda y 180 ha. en la margen derecha. En el río Coca, en la margen izquierda, se adicionaron 180 ha. una isla de 39 ha. y 2 ha. en la margen derecha; en este río, en la margen derecha se afectaron 79 ha. Todas las superficies que se han adicionado (470 ha. en total) actualmente están con cobertura vegetal y en alguna de ellas se realizan actividades agrícolas. En la margen derecha del río Coca, en el punto de

La Imagen 16 que corresponde al sector de Amarun Mesa y la población del Coca, es resultado de la sobre posición del curso de los ríos Coca y Napo obtenidos de dos imágenes Sentinel (28 07 2018 (amarillo) y 04 01 2020 (blanco)), sobre puestas en la imagen del 02 06 2022. Se observa que la margen izquierda del Río Napo, en el sector de Amarun Mesa, entre el 07 2018 y el 01 2020 (color blanco) (18 meses) ha retrocedido 28 ha. a razón de 1,6 ha mensuales; mientras que entre el 01 2020 y el 05 2022 (gris oscuro) (17 meses) se erosionaron 83 ha., aproximadamente a razón de 4.9 ha. mensuales; el río Coca, en su margen izquierda, en este período descrito, afectó a 191 ha erosionando sus orillas así como inundado un amplio sector. La velocidad erosiva en esta área en el período 01 2020 - 05 2022 estaría directamente relacionado con el proceso del Alto Coca, si se lo compara con la velocidad del período 07 2018 - 01 2020: la carga de sedimentos que arrastra el río altera drásticamente el régimen fluvial.

En general, las modificaciones del cauce del río Napo tienen relación, principalmente, con el cambio de los flujos hídricos; la modificación de los bancos de arena que ha acontecido en el transcurso de los meses



Imagen 17: Google Earth: Comportamiento de los ríos Coca y Napo (zona de confluencia) entre 1985 y 2018.

confluencia con el Napo, en 1985 está presente una zona cubierta de vegetación de aproximadamente 67 ha., esta no se observa en la imagen de 1969 como tampoco aparece en la del 2003.

Los dos ríos, en el lapso de 33 años (1985 – 2018), exhiben el comportamiento típico de los ríos en la planicie amazónica. Su curso varía en función de la carga de los sedimentos que transportan y, del volumen y energía del agua. En este sector de confluencia de los dos ríos (Coca – Napo), tanto la margen derecha como la izquierda han sufrido profundas modificaciones en ese lapso de tiempo. Los habitantes de la comunidad de Amarun Mesa en particular, ante esta dinámica, se vieron obligados a replegarse conforme las orillas fueron siendo erosionadas -en el 2003 la comunidad estuvo localizada a unos 830m al sur de la posición actual (Imagen 17)-, fenómeno erosivo que será permanente afectando, en consecuencia, la superficie habitable de la comuna que con el transcurrir de los años se volverá cada vez más pequeña.

Cabe señalar que la forma de los cauces, en especial en la llanura amazónica, está en función de las características hidrológicas, la geología, la vegetación, el clima y así como de las acciones antrópicas que tienden a incidir en el perfil de los cauces naturales; la morfología de los ríos es resultado de la erosión, transporte y sedimentación de las partículas de suelo, que está en función de las características hidrológicas y geológicas de la cuenca, y de las propiedades de los sedimentos. Los desplazamientos laterales en las curvas e incluso en tramos rectos que sufren los ríos especialmente en épocas de crecida, producen erosión en la margen exterior o cóncava, mientras que en la interior o convexa se acentúa la sedimentación, estos procesos deben ser controlados para evitar que el río afecte a las poblaciones e infraestructuras existentes, para ello es necesario conocer la dinámica del río -su comportamiento histórico- y con ello decidir la construcción de obras o el uso de materiales que contribuyan a proteger las orillas; la garantía de que las obras se sostengan en el tiempo estará en función de la dinámica hidrológica del río. No está por demás señalar que acciones antrópicas también son responsables de la inestabilidad de las orillas de un río debido a consecuencia de la deforestación, expansión de la frontera agrícola, dragado, minería, extracción de materiales y otras actividades que las alteran.

Un estudio realizado por la Universidad Central en el que se procesó la información aplicando el HEC-RAS⁶⁵ (*Hydrologic Engineering Center - River Analysis System*), estableció entre las causas por las que se produce la erosión en las orillas del río Napo y sus embarcaderos las intensas precipitaciones que se presentan en la zona, las que provocan inundaciones o desbordamientos. Señala que la margen izquierda del río es la que sufre un intenso proceso de erosión hídrica, consecuencia del desborde del caudal de crecida y luego por el retorno de este caudal a su cauce. Destaca que el tránsito de embarcaciones que circulan a gran velocidad «deslizadores»- generan grandes olas que impactan en las orillas del río debilitándolas, contribuyendo a que éstas se erosionen. Enfatizan que el impacto del agua sumado a la abrasión de partículas, sedimentos, arena transportadas en el vaivén de las olas, van desgastando las orillas.⁶⁶ En el estudio citado se destaca que el Napo es un río de tipo entrelazado e inestable con una intensa dinámica de formación de bancos de arena e islas. Es un cauce inestable con altos valores de transporte de sedimentos en las zonas más profundas en condiciones de estiaje, que se generalizan a toda la sección en creciente, lo que provoca que estas zonas vayan variando en el tiempo debido a su desequilibrio constante provocando erosión y sedimentación en

⁶⁵ Software que permite realizar cálculos de flujo estacionario unidimensional, de flujo no estacionario unidimensional y bidimensional, cálculos de transporte de sedimentos/lecho móvil y modelos de temperatura y calidad del agua.

⁶⁶ Jaya S., Villarreal C., Coronel M., y Couto M. 2021. Estudio Fluviomorfológico del Río Napo para la Protección de sus Orillas, Caso Parroquia de Pañacocha y sus Embarcaderos. Revista INGENIO Vol. 4 N.º 1 (2021). <https://revistadigital.uce.edu.ec/index.php/INGENIO/article/view/2977/3689>

diferentes sitios (ver Imagen 16 sobre el comportamiento de los ríos Coca y Napo en el punto de confluencia – imágenes Google Earth de 1985 y 2018).

En los 26 meses, desde que empezó la erosión regresiva del río Coca, el proceso, directa o indirectamente, ha provocado severos daños en la infraestructura tanto vial como de oleoductos. Las miles de toneladas de material son arrastradas y contribuyen a acelerar los procesos de erosión en las márgenes del río Coca aguas abajo, así como en el Napo. Este proceso durará años o décadas, más aún que el tiempo de estabilización en el alto Coca tomará algunas décadas. Es importantes tener presente que, hasta que no se estabilice el área, existe el potencial de movilizar al menos 90 millones de metros cúbicos de sedimentos.

Durante las visitas de campo se consultó a algunos habitantes que residen en las vecindades de los dos ríos (Coca y Napo) sobre su apreciación de lo que estaba ocurriendo en las aguas. Varios recordaron lo que observaron luego del sismo de 1987 ocurrido en El Reventador. A consecuencia del citado evento, ocurrieron varios deslizamientos en los ríos Salado y Coca, estos ocasionaron represamientos temporales, lo que provocó que los caudales del río Coca, aguas abajo, desciendan de manera significativa. Pasadas algunas horas los pobladores señalaron que el río (Coca y Napo) súbitamente incrementaron los caudales, el agua era “espesa”, arrastraba consigo animales, vegetación, enceres, algunos citaron haber visto también cadáveres; pasaron varios días hasta cuando se pudo navegar y pescar. Si bien cuando desapareció la cascada, en los dos ríos los caudales no evidenciaron características como lo descrito con relación al terremoto de 1987, la carga de sedimentos se incrementó significativamente limitando la navegación, así como afectando la actividad pesquera.

En el año 2002 describen un desbordamiento del río, que ingresó hacia la zona poblada aproximadamente 10m desde las orillas del río. Varias de las personas entrevistadas, en el sector de las Minas de Huataraco, coinciden que en los meses de enero a abril (épocas lluviosas) es cuando el río Coca aumenta su caudal. Tanto en el sector del Coca (San Luis, San Carlos) como en las partes bajas, se comentó que el río, desde el inicio de la operación de la represa, exhibe un comportamiento inusual ya que existen crecidas repentinas en un estado considerado como normal del río, estas crecidas las atribuyen a la apertura de las compuertas -no se pudo confirmar la recurrencia de la apertura de los desarenadores de la presa-; se indica que no existe un sistema para alertar a las comunidades aguas debajo de la apertura de esos mecanismos de evacuación de aguas retenidas por la represa lo que también sirven para evacuar los sedimentos retenidos.

6.2.2 Erosión en los Ríos que Drenan en el Río Coca

Los ríos que drenan en el río Coca que se localizan entre lo que fue la cascada y la confluencia del Quijos con el Salado, en las dos márgenes (izquierda y derecha), esbozan un proceso de erosión a lo largo de sus cauces. Los casos más reconocidos corresponden a los ríos Montana al Piedras Finas en diciembre del 2021. El 22 de octubre de ese año colapsó el puente de la E45 que existía sobre el río Montana; ante esta situación el MTOP habilitó, en este sitio, una variante de 650m. Este evento fue, sin duda, un llamado de alerta a observar el comportamiento de los afluentes, en especial los que drenan en la margen izquierda del río Coca. No obstante lo acontecido, la erosión del río Piedras Finas afectó severamente a la E45, inhabilitando la conexión de la región nororiental ecuatoriana con la sierra norte, obligando a utilizar la ruta Hollín – Loreto – Coca (E20 – E45).

Este comportamiento de los ríos afluentes era esperado, fue alertado por varios profesionales al inicio del proceso erosivo. Sin embargo, no se actuó con la oportunidad debidas. La evidencia es la construcción de las variantes de los ductos petroleros a unos 150m del margen

izquierdo del avance erosivo (sector río Montana), los que meses más tarde se vieron obligados a replantear los trazados desplazándolos más de 350m .

Los ríos Malo y Loco están expuestos a que acontezca un procesos similar a lo anteriormente descrito. En el caso del río Malo, la erosión del cauce es ya evidente. La serie de imágenes ilustran el proceso. La Imagen 19, que corresponde a Google Earth, se la toma como referencia para contrastar con las imágenes obtenidas de las ortofotos del IGM del 15 09 2021 y del 27 04 2022 (Imagen 18). En ocho meses la erosión, aguas arriba del Malo ha ampliado la desembocadura en el río Coca, ha ensanchado el cauce y ya ha recorrido unos 200m aguas arriba. Si bien la erosión no tiene la magnitud de lo que se observa aguas abajo del río Coca o de los afluentes como el Montana o el Piedras Finas.



Imagen 19: Foto de Google Earth (09 2013) de la confluencia del Río Malo en el Río Coca.



Imagen 18: Confluencia del Río Malo con el R. Coca: comparación de imágenes obtenidas de ortofotos del IGM (15 09 2021 - 27 04 2022).

En este punto la erosión se ha ralentizado, se estima que el cauce del Malo y el Coca se han profundizado unos 6m. La presencia de rocas de la formación Misahuallí en la margen derecha del R. Coca y de brechas del Reventador Basal estarían deteniendo la intensidad erosiva del río; no se descarta la presencia de flujos de lava del volcán Reventador (J. Sevilla / B. Beate com. pers.).

6.3 Impactos del Actual Proceso Erosivo

La erosión, consecuencia de la desaparición de la cascada, ha provocado varios y severos daños a la infraestructura situada aguas arriba, como también ha afectado a poblaciones asentadas aguas abajo de la misma. Este proceso también ha impactado en la economía. Aguas arriba provocó la rotura del Sistema de Oleoductos Trans Ecuatoriano (SOTE), el Oleoducto de Crudos Pesados (OCP) y el poliducto Quito – Shushufindi; en la primera rotura del 7 de abril del 2020, el SOTE habría derramado 4900 barriles, el poliducto 2000 barriles y el OCP 8900 barriles⁶⁷, que provocaron una grave contaminación ambiental aguas abajo que afectó suministros de agua potable, la salud de pobladores ribereños – se estima que 120 personas presentaron problemas de salud a consecuencia del derrame de abril del 2020-⁶⁸, así como las actividades de pesca, además de afectar a la biodiversidad; en la 2da rotura (del OCP), en Piedras Finas, causada por el desprendimiento de una roca, se habrían derramado unos 6300 barriles de los que fueron recogidos -según reportes de la empresa- unos 5300 barriles⁶⁹, ocasionando, nuevamente, contaminación aguas abajo. Según el Servicio Nacional de Gestión de Riesgos y Emergencias en el primer derrame (abril 2020) se habrían afectado de manera indirecta a unas 26.804 personas

⁶⁷ Oficio Nro. MAE-MAE-2020 de 28 de abril de 2020, del Ministro de Ambiente (e) Mgs. Paulo Arturo Proaño Andrade.

⁶⁸ Hasta 25.000 personas son afectadas por erosión regresiva del Río Coca. <https://www.primicias.ec/noticias/economia/personas-afectadas-erosion-rio-coca/>

⁶⁹ 6.300 barriles se derramaron en última rotura del OCP, confirmaron ministro de Energía y la empresa petrolera. El Universo. 1 de febrero, 2022.

de Napo, Orellana y Sucumbíos⁷⁰.



Foto 9: Garza Blanca (*Ardea alba*) afectada por el derrame de crudo del 28 enero del 2022. Río Coca sector Guayusa.



Foto 9: Crudo en las orillas del Río Coca.

El proceso erosivo condujo a que se construyan siete variantes para los oleoductos y poliducto, no obstante las oportunas alertas expresadas por profesionales en cuanto a la necesidad de diseñar una nuevo trazado para los oleoductos. La E45 también sufrió los impactos por la erosión, actualmente no es factible transitar por esa ruta; los pobladores de El Reventador y San Luis, están construyendo, por su propia iniciativa, una variante vial en el sector de Piedras Finas para ello, ante la lenta respuesta de parte de las autoridades, los moradores se organizaron, recogieron recursos, realizaron mingas, además de contrataron maquinaria para tener conectividad, el valor invertido supera los US\$ 90 000; el MTOP, de su parte, expresaron no pueden ejecutar trabajos en la vía construida por iniciativa de los pobladores, ya que *“el trazado es peligroso y está expuesto a deslizamientos de tierra”*⁷¹. Entendiendo la urgencia de tener conectividad, él área por el tipo de material sobre el que se está construyendo esta vía alterna, es fácilmente erosionable constituyéndose en una zona muy inestable. Los pobladores están cobrando US\$ 10 dólares como peaje por cada vehículo que la utiliza.

Aguas abajo, la carga de sedimentos que lleva el río Coca, se estima que se han movilizado entre 120 y 160 millones de metros cúbicos (J. Sevilla com. per.), ha provocado impactos severos en la navegación, ha alterado el curso de los ríos Coca y Napo, ha afectado las actividades de pesca, está acelerando procesos erosivos en las orillas poniendo en riesgo a poblaciones asentadas en sus orillas, como también están ocurriendo inundaciones en algunos sectores del río Coca afectando cultivos, así como socavando las bases de algunos puentes. La casa de máquinas de la hidroeléctrica Coca Codo Sinclair está en riesgo a consecuencia de los sedimentos. El nivel entre el sitio de restitución de las aguas turbinadas y



Foto 10: Vía alterna construida por los pobladores de San Luis y El Reventador en el sector de Piedras Finas

⁷⁰ Informe de Situación – Socavamiento Napo. Informe No. 67. 18 de febrero de 2022. Servicio Nacional de Gestión de Riesgos y Emergencias. Quito. https://www.gestionderiesgos.gob.ec/wp-content/uploads/2021/01/Informe-de-Situacion-No-041-Socavamiento_11012021.pdf

⁷¹ Pobladores construyeron su propia carretera ante la erosión del río Coca. Lucía Vásconez. Abril 29, 2022. El Comercio. <https://www.elcomercio.com/actualidad/ecuador/pobladores-construyeron-propia-carretera-rio-coca.html>

el río ha disminuido a consecuencia de los sedimentos depositados en este sector, por lo que ante una creciente del río se pudiese llegar a inundar la casa de máquinas.

El centro poblado de San Luis, en donde habitan aprox. 400 personas, en la parroquia Gonzalo Díaz de Pineda, cantón El Chaco, se desarrolló principalmente debido a la construcción del proyecto Coca Codo Sinclair, dado que ya que uno de los campamentos del proyecto, el “San Luis, ventana 2”, se estableció en el lugar. Antes de que se inicie la construcción de la hidroeléctrica el poblado era pequeño, la mayor parte de las tierras se las destinaba a la agricultura y ganadería. Sin embargo, debido a la demanda de mano de obra para el PHCCS la mayoría de sus pobladores fueron contratados, por ello se descuidaron las actividades agrícolas como la producción de naranjilla y tomate, así como actividades ganaderas que perdieron importancia; el trabajo asalariado se constituyó en la principal fuente de ingresos de este poblado mientras duró la construcción de la hidroeléctrica. El crecimiento poblacional de San Luis estuvo asociado con la demanda laboral de SINOHYDRO para la construcción de la hidroeléctrica, que ocasionó un proceso migratorio principalmente de Chimborazo, Cañar, Tena, Lago Agrio y de Colombia⁷².

En el PDOT del cantón El Chaco⁷³, tanto San Luis como San Carlos, estaban concebidas como zonas futuras de crecimiento, reconociendo que se localizan en sitios con alta vulnerabilidad a riesgos naturales lo que pondría en riesgo inversiones futuras en servicios; cabe señalar que estos dos poblados fueron los más afectados durante el terremoto de marzo de 1987. Uno de los campamentos de CCS se encuentran en las inmediaciones, por lo que el sector es uno de los que más ha sido influenciado por el proyecto en todos los aspectos.

San Luis está en amenaza de desaparición por el proceso erosivo, dado que se encuentra asentada en una terraza que corresponden a los materiales que rellenaron el valle luego de haberse represado el río Coca a consecuencia del flujo de lava que formó la cascada. Estos materiales se erosionan con facilidad. El proceso erosivo ya ha dejado varios damnificados, campesinos que perdieron sus cultivos y parte de sus fincas, negocios que dependían del turismo si bien algunos se mantienen gracias las actividades que se implementan para el arreglo de los oleoductos / poliducto y de la vía E45. El poblado está en emergencia; por el riesgo al que está expuesto, se analiza la posibilidad de reubicarlo.

La profundización de la erosión está acompañada por erosión lateral que ocasiona la expansión horizontal del cauce, así como la ampliación “del valle”. El agua, al erosionar la base de las orillas del río, genera inestabilidad en los taludes y los consecuentes derrumbes algunos de los que represaron el río, estos materiales movilizados corresponden a sedimentos, avalancha, cenizas volcánicas, escombros, etc. que se acumularon aguas arriba de lo que fue la cascada, desde el momento que el flujo de lava represó el río. El actual proceso erosivo está produciendo un radical cambio geomorfológico, con especial impacto en la margen izquierda del río, el mismo que se irá atenuando en la medida que el río recupere el paleo cauce original.

El proceso de erosión es bastante agresivo. Los extensos frentes laterales de erosión, que algunos casos superan los 80 m de profundidad, han afectado el tendido de los oleoductos / poliducto, ocasionando que se hayan construido al menos siete variantes. También han afectado los puentes sobre los ríos Montana y Piedras Finas. En estos dos ríos, la erosión que se está

⁷² Polanco Loza D.A. 2013. Hidroelectricidad y Turismo en la Amazonía: El caso del Proyecto Hidroeléctrico Coca Codo Sinclair en el cantón El Chaco, provincia de Napo. Tesis para obtener el título de maestría en Estudios Socioambientales. Facultad Latinoamericana de Ciencias Sociales - Sede Ecuador. Quito.

⁷³ GOBIERNO AUTÓNOMO DESCENTRALIZADO MUNICIPAL DEL CANTÓN EL CHACO. Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial. Administración 2014 - 2019.

dando en sus cauces evidencia el nivel de inestabilidad de los materiales que rellanaban aguas arriba de lo que fue la cascada y que están presentes en las faldas del volcán Reventador, como también en la margen derecha del río. En el seguimiento al procesos erosivo en el río Piedras Finas, en términos de vigilancia por parte de las autoridades responsables, no mantuvo un patrón similar al observado con la rotura del 7 de abril del 2020, en esta oportunidad se realizó algún seguimiento pero ya cuando el proceso erosivo estaba por afectar tanto a los oleoductos / poliducto como al puente; con dicha acción se previno potenciales derrames mediante el cierre oportuno de las válvulas con unos días de antelación: Petroecuador realizó actividades preventivas para “mitigar cualquier afectación a los sistemas de transporte de hidrocarburos”⁷⁴.



Ejemplo de erosión lateral por flujo subsuperficial. Abundan en todo el cauce.

Foto 11: Ejemplo de erosión Lateral por escorrentía sub-superficial - sector río Montana (Foto: Emilio Cobo, 12 07 2021).

Es importante destacar, sin embargo, no obstante lo señalado en el párrafo anterior en lo referido a Piedras Finas, que la atención no estaba en realizar el seguimiento al proceso erosivo lateral: Fernando Santos Alvite⁷⁵, ex ministro de energía y consultor petrolero, lo deja muy claro en una entrevista celebrada en Radio de la Asamblea Nacional el 20 12 2021: “es un fenómeno natural nunca visto, el río Quijos que es afluente del Coca y el Coca eran los que sufrían la erosión regresiva y todos los ojos estaban puestos en ellos y se los

veía “normales”; de pronto unos dos pequeños riachuelos laterales, el río Malo y el Piedras Finas comenzó la erosión alguien (sic) que **no podía preverse.**” (lo resaltado a propósito). Cabe señalar que profesionales, a los pocos meses de la desaparición de la cascada, alertaron sobre la importancia de realizar un seguimiento al proceso erosivo lateral. Emilio Cobo, el 16 de junio del 2020, señaló que “el proceso de erosión regresiva no solo avanzará por el cauce principal, sino que se ramificará por todo afluente...”⁷⁶, además destaca en la fotografía el papel de las aguas sub-superficiales en el proceso de erosión; Alfredo Carrasco en entrevista del 23 05 2020, alerta sobre la importancia de vigilar la erosión lateral, mientras que en la entrevista del 20 12 2020, señala que “.. de continuar el proceso no solo va a erosionar el río Quijos (Coca) sino todos los afluentes que drenan al Quijos (Coca) entre ellos el río Malo”⁷⁷.

Las acciones de prevención se tomaron a pocos días de que se rompan los ductos en el sector de Piedras finas. El domingo 5 de diciembre del 2021, la empresa OCP Ecuador emitió un comunicado anunciando que había iniciado el movimiento de la tubería para la construcción del noveno *bypass* temporal luego de que la erosión regresiva alcanzara la zona de Piedra Fina, ya en la provincia del Napo. En la mañana del miércoles 8 de diciembre, OCP Ecuador informó, mediante un comunicado, que inició el drenaje de crudo y que suspendió el bombeo “ante el

⁷⁴ Erosión en río Coca está a 20 metros de vía E-45 y a 30 metros de oleoductos. Nota original en Primicias.ec 05 12 2021: <https://www.primicias.ec/noticias/economia/erosion-lateral-rio-coca-oleoductos/>

⁷⁵ Entrevista a Fernando Santos Alvite, ex ministro de energía. Radio de la Asamblea Nacional. 21 12 2021 (min.: 3.45 – 4.22). <https://www.facebook.com/laradioasambleanacional/videos/2959318847731451/>

⁷⁶ Emilio Cobo @ze_cobo https://twitter.com/ze_cobo/status/1273060134365913091

⁷⁷ Alfredo Carrasco Valdivieso. 23 05 2020. <https://www.facebook.com/alercaval/videos/10157591160121387>
<https://www.facebook.com/CesarMontufar51/videos/2619421668340705>

Petróleo y Desarrollo 22 De Diciembre 2020 Invitado Ing. Alfredo Carrasco Tema Análisis Erosión R <https://www.youtube.com/watch?v=yfXoTazHz-w>

avance del imprevisible fenómeno natural de la erosión regresiva en la zona de Piedra Fina, provincia del Napo, como medida preventiva”. Anuncios similares lo hizo Petroecuador; ese mismo día, el MTOP suspendió también la vía por Baeza, anunciando que se usará la vía alterna hacia Loreto y Coca.



Foto 12: Variante de los oleoductos (SOTE - OCP) al ingreso a lo que fue la cascada de San Rafael (Foto: Alfredo Carrasco Valdivieso 06 2020).



Ilustración 5: Variantes (7) realizadas por Petroecuador en el 2021. Fuente: Gerencia Petroecuador.

Es importante tener presente que los derrumbes / deslizamientos, consecuencia del proceso erosivo, de continuar la tendencia actual, pueden provocar roturas de la tubería en cualquier momento, similares a los que ya aconteció en abril del 2020 o diciembre 2021, ya que existen numerosos avances erosivos, longitudinales y laterales, a lo largo de los más de 12 km de erosión, aguas arriba, con respecto al sitio de la antigua Cascada de San Rafael.

La construcción de variantes / bypass ha sido la constante desde cuando ocurrió la primera rotura en abril del 2020. A enero del 2022 se habían habilitado 7 variantes para el SOTE, 9 “bypass” temporales para el OCP, y 5 variantes para el poliducto. Ante esta realidad el riesgo de nuevas roturas es alto, lo que además de paralizar

el transporte de crudo, un nuevo derrame afectará aún más al ambiente y a las comunidades. El peligro de colapso amenaza a la tubería a lo largo de 20-30 km.

6.3.1 Proyecto Hidroeléctrico Coca Codo Sinclair (PHCCS)⁷⁸

El PHCCS, considerada “obra emblemática del Gobierno Nacional”⁷⁹ (gobierno de Rafael Correa), cuya construcción se inició en julio de 2010, aprovecha el caudal del río Coca que tiene una media anual de 287 m³/s, así como el desnivel topográfico de 620 m, para generación hidroeléctrica. Este proyecto fue inaugurado el 18 de noviembre de 2016, toma el nombre del geólogo Joseph Sinclair quien destacó que el río Coca mostraba una curva marcada, la misma que posteriormente fue bautizada como Codo Sinclair.

El PHCCS fue considerado por Plan Nacional de Electrificación como un proyecto importante durante los años setenta y ochenta. El Instituto Ecuatoriano de Electrificación

⁷⁸ Jiménez-Mendoza, S. y Terneus-Páez, F. (2019). «Nexo agua – energía: Análisis del flujo hídrico del Proyecto Hidroeléctrico Coca Codo Sinclair». Ingenius. N.º 21, (enero-junio). pp. 53-62. doi: <https://doi.org/10.17163/ings.n21.2019.05>

⁷⁹ Inician pruebas hidráulicas del Proyecto Hidroeléctrico Coca Codo Sinclair. Nota de prensa CELEC EP. <https://www.celec.gob.ec/gensur/index.php/62-el-proyecto-hidroelectrico-coca-codo-sinclair-que-es-parte-de-la-corporacion-electrica-del-ecuador-inicia-hoy-las-primeras-pruebas-hidraulica>

(INECEL), fue el encargado de realizar estudios los mismos que se iniciaron en 1976: el de prefactibilidad y el de la capacidad total de aprovechamiento⁸⁰; estos estudios incluyeron los análisis sísmicos y vulcanológicos que pudiesen afectar al proyecto.

El diseño de factibilidad se lo realizó entre 1990 y 1992 cuyo diseño propuso que se efectúe en dos etapas continuas que generarían 432 (MW) y 427 (MW) de potencia respectivamente. El estudio tomó en cuenta los efectos del terremoto de marzo de 1987 cuyo epicentro fue en Cascabel, a pocos kilómetros del volcán Reventador. En el 2007, en el gobierno de Rafael Correa, se modificó dicho estudio y fue rediseñado hasta alcanzar una potencia de 1500 (MW) [18], al mismo que se lo anunció en enero del 2007 como de “alto interés nacional”. Los estudios fueron aprobados en 2008 por el CONELEC.

La Compañía Hidroeléctrica Coca Codo Sinclair S. A. de Quito, encargó a la Compañía Consultora ELC-Electroconsult de Milán, Italia los estudios de rediseño conceptual para alcanzar 1500 (MW). La empresa SINOHYDRO fue contratada para el desarrollo de ingeniería y la que inicia su construcción [20]. El 18 de noviembre de 2016 se inauguró el PHCCS [21].

Las principales obras que conforman el PHCCS son : i) La obra de captación, localizada a 1km aguas abajo de la confluencia de los ríos Quijos y Salado - presa de 31,8 (m) de altura máxima, vertedero con una altura del azud de 13,5 (m) y ancho neto de 160 (m), desarenador de 8 cámaras-; ii) túnel de conducción - longitud de 24,8 (km), 9,10 (m) de diámetro de excavación y un diámetro interior de 8,20 (m), caudal de diseño de 222 (m³/s)-; iii) embalse compensador - una presa de enrocado con cara de hormigón de 58 (m) de altura, un embalse útil de 800 000 (m³)-; iv) tuberías de presión (2) - conducen el agua desde el embalse compensador hasta la casa de máquinas, en hormigón y con revestimiento de acero en su tramo final, de 1400 (m) de longitud y tienen un diámetro interno de 5,8 y 5,2 (m) respectivamente, el caudal de diseño es de 139,25 (m³/s) cada una -; y, v) casa de máquinas en una caverna excavada en roca de 26 × 46,8 × 219,5 (m), en ella se localizan 8 turbinas tipo Pelton de eje vertical con 6 inyectoros cada una y una potencia unitaria de 187,5 (MW).⁸¹

Actualmente, este proyecto es cuestionado por la calidad de las obras. No ha sido aún recibido por CELEC. Si bien el proceso erosivo, de llegar hasta la represa pondría en serio su operación, otros son los problemas que también afecta actualmente su operatividad. La presente consultoría no tenía el propósito de analizar esta problemática, pero por su relevancia se la hace referencia. Entre los principales problemas detectados están: la presencia de miles de fisuras y micro fisuras localizadas en los distribuidores, estos son los que reciben el agua a gran presión para dirigirla a las turbinas que generan energía; además se señala que existen inconvenientes en elementos como: los rodetes, válvulas esféricas, falta de pernos, ejes, entre otros. Varios de los problemas ya se habrían detectado a las 72 horas de inaugurada la central. La reposición de esos distribuidores podría costar USD 1010 millones.⁸²

6.3.1.1 *Represa de captación de agua para la central hidroeléctrica / Túnel de Restitución*

Se ubica en el sitio El Salado a unos 400 m. aguas abajo de la confluencia de los ríos Quijos y Salado. La obra de captación es una estructura conformada por una presa de enrocado con cara de hormigón de una altura de 31,8 m., un vertedero libre con una capacidad de descarga

⁸⁰ CENACE, Informe anual 2017. Operador Nacional de Electricidad. Ministerio de Electricidad y Energía Renovable., 2017. [Online]. Available: <https://goo.gl/Hc9wsB>

⁸¹ Jiménez-Mendoza S. y Francisco Terneus-Páez. 2019. Nexa agua – energía: Análisis del flujo hídrico del Proyecto Hidroeléctrico Coca Codo Sinclair. INGENIUS N. ° 21, enero-junio de 2019

⁸² Ecuador sin resolver problemas en hidroeléctrica Coca Codo Sinclair construida por empresa de China. Mercedes Onofa. Diálogo Américas. 11 01 2022.

máxima de 12.500 m³/s y un desarenador diseñado para un caudal de 222 m³/s, más el caudal necesario para su limpieza y para sedimentar partículas de diámetro superior a 0,25 mm. Las aguas captadas ingresan por la obra de toma y luego de pasan por el desarenador para ser conducidas al túnel de conducción. Las aguas son conducidas a un embalse (Vaso Compensador) que tiene una capacidad para almacenar 800.000 metros cúbicos, desde el que se precipitan con una caída libre 620 metros, por dos tuberías de presión, las cuales a su vez se ramifican (dividen) en 8 tuberías que alimentan 8 turbinas que mueven a los generadores, los cuales producen la energía eléctrica.

El Túnel de Restitución es un elemento importante para la operación del PHCCS, ya que a través de este se realiza la descarga hacia el río. El túnel tiene una sección en forma de baúl, para un caudal total de 278,50 m³/s. Tiene 12,40 m. de alto, 11,40 m. de ancho y unos 792 m. de longitud. Al final del túnel existe un canal trapezoidal de 156 m. de largo y 22 m. de ancho que desemboca en el Río Coca.

6.3.2 Estación de bombeo «El Salado»

La estación de bombeo del SOTE (Petroecuador) se encuentra en las inmediaciones de la represa de captación de agua para la central del Coca Codo Sinclair. Si bien la erosión se ha ralentizado desde el sector de la confluencia del río Malo con el Coca, es vulnerable a una potencial erosión del cauce del río Coca que podría causar la destrucción de la estación. Es por este motivo que la petrolera estatal está analizando alternativas para reubicar la estación de bombeo, infraestructura importante del Sistema del Oleoducto Transecuatoriano (SOTE). Funcionarios de la empresa que es necesario prepararse para el peor de los escenarios⁸³. Cabe señalar que Petroecuador está analizando la construcción de una nueva y definitiva variante del Sistema de Oleoducto Transecuatoriano (SOTE) y del Poliducto Shushufindi-Quito está en análisis, la que se construiría por la margen derecha del río Coca, lo que implicaría también el cambio del sitio de la estación de bombeo.

Esta no sería la primera ocasión que la Estación de Bombeo este en riesgo. Durante el terremoto del 5 de marzo de 1987, sufrió severos daños causados por deslizamientos que ocurrieron debido al sismo. Los escombros rompieron el tanque principal, cubrió totalmente la válvula principal. La estación la componen la válvula principal, casa de control. Generadores, casa de bombeo, tanque de agua, tanque de petróleo, viviendas para el personal. Por los impactos que provocó el sismo en la Estación y en el SOTE, se construyó un oleoducto entre Nueva Loja (Lago Agrio) y San Miguel (Colombia) el que fue utilizado hasta cuando se restituyó la capacidad de transporte por el oleoducto trans-ecuatoriano en agosto de ese año.

6.3.3 San Luis

Un informe del Servicio Nacional de Gestión de Riesgos (SNGR), del 20 de mayo de este año (2021), señaló que la comunidad San Luis se encuentra en una zona de alto riesgo por lo que preveían una



Foto 13: Poblado de San Luis, a la izquierda el río Coca, a la derecha E45 colapsada. (Foto: Alfredo Cárdenas, El Universo 27-05-2021).

⁸³ Petroecuador analiza reubicación de estación El Salado por erosión. Wilmer Torres 24 febrero 2021. Primicias. <https://www.primicias.ec/noticias/economia/petroecuador-reubicacion-estacion-salado-erosion-rio-coca/>

tragedia inminente. A esa fecha la tasa de erosión que estimaron en la zona de San Luis estaba alrededor de 0,41 m/día. La distancia de la vivienda más cercana del poblado con respecto del filo del socavón es de 123 metros, “por lo que se estima que el proceso regresivo lateral llegaría a afectar a dicha infraestructura en 299 días”⁸⁴. En el informe No. 67 del 18 de febrero del 2022, la SNGR indica que el socavón, en este sector, se encontraba a 91m⁸⁵ de la casa más cercana; el Concejal de Chaco Gildo Velasco (03 06 2022) indicó que al 31 de mayo del 2022 ya se había reducido a 77,6m.



Imagen 20: San Luis / Piedras Finas _ Río Coca. Avance del proceso erosivo entre julio 2021 y abril 2022.

Una análisis comparativo de imágenes satelitales de Planet (Imagen 20) muestran que entre el 07 2021 y el 04 2022, se erosionaron 11,6 ha ha. en el sector de Piedras Finas a razón de 1,16 ha. al mes; mientras que en San Luis lo fueron 9,3 ha. equivalente 9.300 m² al mes.

Para visualizar la incidencia erosiva en el caso de San Luis, se estableció una área de análisis de 60. Ha que incluye el centro poblado (Imagen 21). Se utilizaron imágenes Planet. Se observa que al 01 05 2022 el área analizada se redujo a 34.4 ha, cabe señalar que los primeros indicios de erosión en este sector corresponden a junio del 2020. Lo anterior implica que en 23 meses (junio 2020 – 05 2022) se erosionaron aproximadamente 25,6 ha. a razón de 1.11 ha. / mes, por lo que,

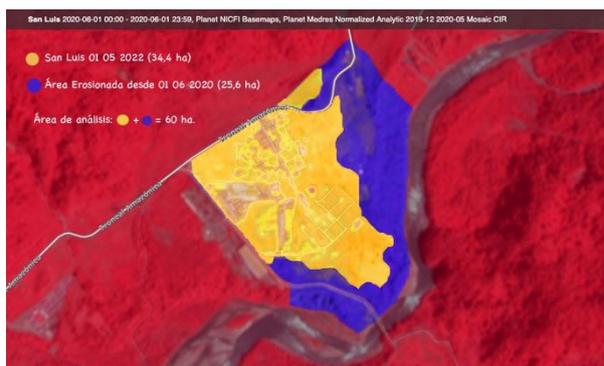


Imagen 21: Área de análisis de San Luis: 60 ha. En 23 meses se redujo a 34.4 ha.

de mantenerse la velocidad erosiva actual, el poblado pudiese desaparecer dentro de un período comprendido entre tres y cinco años, proceso que estará en función de las precipitaciones, la escorrentía subterránea, el nivel de consolidación de los materiales, así como de la variabilidad del curso del río Coca.

Los 216 habitantes de San Luis están seriamente preocupados por el avance de este fenómeno, sin embargo ninguno de ellos había abandonado el poblado a la fecha en la que el equipo consultor Randi Randi / WCS realizó lo visitó (4 de marzo 2022). La incertidumbre es que no saben a dónde ir ni cómo ni cuándo, pese a que la alerta roja -que implica una evacuación inmediata- está vigente. La expectativa, frente a la realidad que viven diariamente, es que se construya la nueva vía por la margen derecha del río Coca, en ese sector ya se habrían determinado 50 ha para la relocalización según informó el Concejal del GADP de El Chaco.

⁸⁴ Alerta roja por la erosión en el río Quijos, en la Amazonía ecuatoriana; el socavón ya llegó al borde de la comunidad San Luis. Xavier Reyes. 30 de mayo, 2021. El Universo.

⁸⁵ Informe de Situación No. 67. Erosión Hídrica Regresiva en el tramo fluvial: Hidroeléctrica Coca Codo Sinclair – Río Napo 18 de febrero de 2022. <https://www.gestionderiesgos.gob.ec/wp-content/uploads/2022/03/SITREP-No-67-Erosion-Hidrica-NapoOrellana-18022022.pdf>

6.3.4 Impactos Económicos

Los impactos económicos de la erosión se estiman en varios cientos de millones de dólares, tanto por que dejó de producir crudo debido a las roturas de los oleoductos y poliducto (en abril del 2020 y en diciembre del 2021) como por la construcción de las variantes y los impactos ambientales / sociales debido a los derrames de petróleo y a la carga de sedimentos que lleva el río.

La rotura de diciembre del 2021 habría afectado la producción petrolera de Ecuador con un descenso de alrededor del 53 %⁸⁶. Producto de la caída de la producción petrolera, baja de exportaciones y costos de volver a poner operativos los pozos que debieron suspender la producción, superaría los \$ 600 millones; Ítalo Cedeño, gerente de Petroecuador, señaló que en el colapso de diciembre (2021) *“se perdieron 528 millones en producción y 57 millones en refinación”*⁸⁷. Para el presupuesto del 2022 habría una reducción de entre \$ 250 millones y \$ 350 millones. La erosión regresiva representa una millonaria caída de ingresos y más gastos al país.

Lo anterior no contabiliza los gastos incurridos en la construcción de siete variantes para mantener en funcionamiento el Sistema de Oleoducto Transecuatoriano (SOTE) y cinco para el poliducto Lago Agrio Quito a un costo de \$ 16,2 millones, mientras que las inversiones del sector privado OCP en la construcción de ocho bypass temporales y dos variantes definitivas asciende a \$ 31 millones⁸⁸. Además de aquellos costos, es necesarios tener en cuenta las variantes viales que se han realizado para garantizar el paso hacia Sucumbíos y actualmente severamente dañado en el sector de Piedras Finas. Otros costos adicionales están asociados a las obras de mitigación del fenómeno para proteger a las obras de captación de Coca Codo Sinclair (el contrato es por USD 12,95 millones y el plazo de ejecución es de 330 días calendario⁸⁹; en la Licitación de Obras publicado en el portal de CELEC se señala US\$ USD 14' 145.932,55⁹⁰ para la construcción de pantallas), los costos de remediación ambiental, las medidas para proteger las riberas del río Coca en la ciudad de Coca, los impactos por la erosión en comunidades asentadas a las orillas del río (p.e. Amarun Mesa, Las Minas de Guayusa).

Con menor producción, menores ventas externas y mayores importaciones de derivados, habría un impacto tanto en el crecimiento como en las cuentas fiscales, aseguró el Ministerio de Economía y Finanzas. Por el lado de la actividad, el crecimiento podría ser afectado en -0,3 % hasta -0,5 %, entre 2021 y 2022.⁹¹

⁸⁶ La producción petrolera de Ecuador afectada de nuevo por erosión del río Coca. Contenido publicado el 14 diciembre 2021. https://www.swissinfo.ch/spa/ecuador-petr%C3%B3leo_la-producci%C3%B3n-petrolera-de-ecuador-afectada-de-nuevo-por-erosi%C3%B3n-del-r%C3%ADo-coca/47192268#:~:text=%2D%20La%20erosi%C3%B3n%20regresiva%20del%20r%C3%ADo,datos%20oficiales%20conocidos%20este%20martes.

⁸⁷ Novik M. 2022. Erosión en el río Coca: en diciembre de 2021 se perdieron USD 528 millones en producción de crudo. Plan V 28 de Enero del 2022. Quito

⁸⁸ Millonaria caída de recursos y más gastos para el 2022 genera el avance de la erosión regresiva en el sector de El Reventador. Patricia Sandoval. El Universo 19 de diciembre, 2021

⁸⁹ CELEC EP Adjudicó y Suscribió el Contrato para las Obras Contempladas en la Etapa 0 para Proteger la Captación de la Central Coca Codo Sinclair. Nota de prensa CELEC. 28 diciembre 2021. <https://www.petroenergia.info/post/celec-adjudic%C3%B3-y-suscribi%C3%B3-el-contrato-en-la-etapa-0-para-proteger-la-captaci%C3%B3n-del-coca-codo>

⁹⁰ Licitación de Obras - Especificaciones Técnicas. Objeto de la Contratación: RCO Construcción de Obras de Protección para Controlar la Erosión del Río Coca –Etapa 0, Ubicadas Aguas Abajo de la Captación de la Central Hidroeléctrica Coca Codo Sinclair. <https://celecloud.celec.gob.ec/s/WEFZQeJHRgBP9xp?dir=undefined&openfile=12018402>

⁹¹ La para de los oleoductos opaca la caída del déficit fiscal. Sebastián Angulo. El Expreso 19/12/2021 <https://www.expreso.ec/actualidad/economia/oleoductos-opaca-caida-deficit-fiscal-117776.html>

7 Acciones Desarrolladas por Entidades del Estado

El primer Informe de Situación que tiene relación con el proceso erosivo que acontecía en el río Coca corresponde viernes, 05 de junio de 2020 a las 21:09:43⁹², como resultado de una reunión de trabajo en la que participaron el MTOP, SNGRE, GAD El Chaco celebrada el 04/06/2020; detalla además de una “nueva inspección de la vía en el sector de San Rafael” en la que habían verificado que el proceso erosivo se había acelerado debido a las lluvias, por lo que se habría incrementado el riesgo a la vía de primer orden (E45). Con fecha El 05 de junio de 2020, el SNGRE emite la Resolución SNGRE-043-2020 mediante la que aprueba el Informe Técnico Nro. SNGRE-DMEVA-2020-011 del 04 06 2020, y establece el nivel de *Alerta Naranja* para la zona de intersección entre la Autopista E-45 y el Río Montana, al posible colapso estructural de la vía. Esta constituye la primera reacción oficial de las entidades nacionales relativo al proceso erosivo que se estaba suscitando en el río Coca.

Públicamente, inmediatamente luego de conocida la desaparición de la cascada, algunos profesionales, alertaron sobre el riesgo para las obras de infraestructura y asentamientos humanos (ver publicaciones / mensajes en redes sociales) debido al proceso erosivo que se estaba dando en el río Coca, como a la erosión lateral que acontecería en los efluentes tributarios a este río; sin embargo, las autoridades de Petroecuador, CELEC, Secretaria de Riesgos, como tampoco la empresa OCP, no actuaron con la celeridad debidas y no realizaron el seguimiento al procesos erosivo y sus posibles impactos. Dos meses más tarde, el 7 de abril, a consecuencia de la erosión del río Coca se rompieron los oleoductos y poliducto situados 1.5 km aguas arriba del sitio en el que se localizaba la cascada a la altura del río Reventador, con las consecuentes afectaciones ambientales y sociales por el derrame de los hidrocarburos, así como por las pérdidas económicas para el país por la paralización del transporte del crudo y sus derivados.

Debido a la rotura los dos oleoductos y poliducto, el 29 de abril de 2020, la Federación de Comunas Unión de Nativos de la Amazonía Ecuatoriana (FCUNAE), la Confederación de Nacionalidades Indígenas de la Amazonía Ecuatoriana (CONFENIAE), Obispos de los Vicariatos de Orellana y Sucumbíos y varias personas afectadas presentaron una acción de protección con medidas cautelares a favor de aproximadamente 135 mil personas afectadas por el derrame de crudo. En su demanda señalan: *“si bien la ruptura de los oleoductos, no ha ocurrido por disposición directa de ninguna autoridad, existen una serie de omisiones y negligencias que las autoridades y empresas demandadas (sic), una de ellas fue **no analizar el fenómeno de erosión regresiva** (resaltado me corresponde) que afectó la cascada de San Rafael, del cual fueron advertidos oportunamente [...]”*. Se destaca en el comunicado que 35 mil personas de las provincias de Sucumbíos y Orellana y otras 100 mil que viven en las orillas del Río Coca y Napo, están riesgo de vida y que la naturaleza ha sido afectada.⁹³

Tanto Petroecuador como OCP informaron el 8 den abril sobre la rotura de los oleoductos y poliducto. lama la atención en el Boletín de Prensa No. 1 de OCP, del 8 de abril, que se señale que se *“detectó una erosión en el cauce del río Coca”* (lo resaltado y en cursiva es mío), frase que me pone a dudar de si realmente conocieron lo acontecido el 2 de febrero y su gravedad.

⁹² Informe de Situación – Socavamiento. Servicio Nacional de Gestión de Riesgos y Emergencias. 05 de junio de 2020 a las 21:09:43h. <https://www.gestionderiesgos.gob.ec/wp-content/uploads/2020/06/Informe-de-Situaci%C3%B3n-No-001-Socavamiento-05062020-1.pdf>

⁹³ ORGANIZACIONES INDÍGENAS, RELIGIOSAS Y DE DERECHOS HUMANOS PRESENTAN ACCIÓN DE PROTECCIÓN Y MEDIDAS CAUTELARES CONTRA EL ESTADO Y EMPRESAS PETROLERAS POR DERRAME DE PETRÓLEO. Boletín de Prensa. https://ddhhecuador.org/sites/default/files/documentos/2020-04/boletin_derrameAE.pdf

El 7 de junio del 2020 Petroecuador emite un boletín mediante el que informa que con “apoyo de la Embajada de los EE.UU., EP Petroecuador y diferentes agencias del equipo de emergencia de este país analizan información del fenómeno de erosión regresiva sucedido en las riberas del río Quijos (Alto Coca), luego de impactar a la estabilidad de la infraestructura del Sistema de Oleoducto Transecuatoriano (SOTE), el pasado 07 de abril”⁹⁴. En las páginas oficiales de Petroecuador EP, antes de aquella fecha (7 de junio), no se hace ninguna referencia a la desaparición de la cascada y sus posibles efectos.

OCP, de su parte, el 8 de abril informó que el 7 de abril en la madrugada “se detectó una erosión en el cauce del Río Coca” la misma que provocó la ruptura de la tubería del OCP. Señalan que, aplicando el protocolo de emergencia, procedieron a suspender el bombeo de crudo a las 17h30 del 7 de abril del 2020.⁹⁵ Llama la atención el comentario “se detectó una erosión...” (lo resaltado es propio), ya que se interpretaría que no estaban realizando el seguimiento debido al proceso erosivo que era de conocimiento público.

CELEC EP el 13 de febrero 2020, emitió un informe relacionado con el proceso erosivo del río Coca, en el que señalan: “Por la distancia de la Central Coca Codo Sinclair a la cascada San Rafael, no amerita planes de contingencia derivados del retroceso de la cascada (...)”. Sin embargo, el 19 de abril 2020 reconoce la necesidad de declarar la emergencia para la protección de sus obras. El 10 de mayo de 2020 decretó estado de emergencia por 60 días y contrató consultorías para topografía, geología, geofísica y modelo conceptual de soluciones, los cuales debían ser entregados en 50 días, 20 días y 30 días, respectivamente. Finalmente, el 11 de junio de 2020 el gerente de CELEC EP señaló que el acceso de la información sería público. En consecuencia, es evidente la inestabilidad en la toma de decisiones por parte de la institución debido a la falta de estudios técnicos frente al proceso erosivo, por tal motivo como academia es importante realizar estudios que acompañen el análisis de este proceso y las afectaciones que pueden ocurrir, no solo aguas arriba sino también aguas abajo.⁹⁶

En un boletín de prensa del CELEC⁹⁷ informa que se ha incorporado el sistema topográfico LIDAR para el estudio y monitoreo de la erosión en el río Coca. Esta acción se da un año después de ocurrida la desaparición de la cascada. Señala que la Comisión Río Coca, constituida por CELEC EP para estudiar y remediar los efectos actuales y potenciales del fenómeno de la erosión regresiva en el río, se capacitaron en el uso de este sistema, que incluye el empleo de dos drones, uno para generar ortofotografías (fotografías de la superficie terrestre), y el otro con un láser, que permite obtener modelos tridimensionales digitales de la cuenca del río.

Estos estudios se complementan con otros realizados hasta la fecha, como es el caso del fluviomorfológico, que mostró los posibles avances de la erosión en el río Coca, considerando la evolución de los caudales. En enero de 2021, concluyeron las perforaciones aguas abajo de las

⁹⁴ Erosión Regresiva: agencias del equipo de emergencia de los EE.UU. cooperan con EP Petroecuador. Quito 07 junio 2020. <https://www.eppetroecuador.ec/?p=8822>

⁹⁵ Erosión en el cauce del Río Coca entre Sucumbios y el Coca ocasiona ruptura del OCP. Boletín de Prensa del 8 de abril del 2020. <https://www.ocpecuador.com/prensa/erosion-en-el-cauce-del-rio-coca-entre-sucumbios-y-el-coca-ocasiona-ruptura-del-ocp/>

⁹⁶ Jumbo Olaya C.I. y Isabel Morales Loor Adriana Natalia. 2021. Escenarios críticos de inundación con caudal líquido en la cuenca baja del río Coca y análisis crítico con caudal sólido en los sectores de Toyuca, San Sebastián y La Playita. Facultad de Ingeniería en Geología, Minas, Petróleos y Ambiental Carrera de Ingeniería en Geología - Universidad Central del Ecuador. Quito.

⁹⁷ CELEC EP incorpora moderna tecnología a los estudios y monitoreo de la erosión en el río Coca. <https://www.celec.gob.ec/cocacodosinclair/index.php/noticias/celec-ep-incorpora-moderna-tecnologia-a-los-estudios-y-monitoreo-de-la-erosion-en-el-rio-coca/563>

obras de captación de la central, cuya información aporta a mejorar el conocimiento de la geología del sector.

CELEC, de su parte, ante el avance del proceso erosivo y la eventual afectación a la represa, en diciembre del 2020 recibió apoyo del *Bureau of Reclamation*⁹⁸ de Estados Unidos, entidad estatal con experiencia en el diseño y construcción de presas y obras hidráulicas. Propusieron la reubicación de las obras de captación de la hidroeléctrica Coca Codo Sinclair (CCS) que incluyen el túnel de captación de agua, una presa de 31,8 metros de altura, un vertedero, un desarenador y compuertas de limpieza, ya que podría tener un costo menor frente a las medidas definitivas que analiza CELEC⁹⁹ dado que el río, a esa época, todavía estaba ajustando su pendiente y altura por lo que consideraron que pasarán años antes de que el río se estabilice. CELEC consideró que la propuesta del Bureau es muy costosa y que amerita tener más estudios para una decisión de esa magnitud; señaló que el presupuesto referencial para las obras definitivas que se realizarían ascienden aproximadamente a USD 120 millones.

El *Bureau of Reclamation* también expresó su alerta sobre la posibilidad que acontezca procesos erosivos laterales de los afluentes al Coca. Destacaron que en la medida que la erosión se desplace río arriba, los afluentes comenzarán a erosionar lateralmente ampliando los valles tributarios. Esta erosión tributaria tiene el potencial de desestabilizar el oleoducto. Es importante esta observación por cuanto esta fue una de las alertas que profesionales realizaron una vez conocida la desaparición de la cascada. Se destaca, en dicho informe, que la colocación de estructuras para ralentizar la energía de las aguas está en función de conocer a mayor detalle la geología, para ello se recomendó realizar exploración geofísica o perforación exploratoria para disponer de información detallada del subsuelo antes de colocar medidas de control de la erosión lateral y vertical. Hicieron énfasis en la complejidad de la geometría tridimensional de los sedimentos y la roca puede que se presenta en un entorno volcánico.

En base a la información disponible, se presenta una rápida y somera revisión técnica de las soluciones de ingeniería para la toma de decisiones relacionadas con la protección de infraestructuras críticas. Destacan que no se proporcionó información sobre las condiciones del lugar, la ubicación del lecho de roca y los caudales actuales. En base a lo que estuvo disponible realizaron consideraciones generales de diseño y destacaron los riesgos asociados a cada medida que se asuma. Reconocieron que las medidas de estabilización propuestas (tablestacas para crear disipadores artificiales; vertedero de desviación del río; rampa de roca para la disipación de energía; presa aguas arriba de la cascada preexistente -la que estuvo activa a la altura del río Montana-; Escalones artificiales con inyección de agua en chorro) pueden no cumplir los objetivos del proyecto porque corren un alto riesgo de ser socavadas o flanqueadas por el río. Propusieron la reubicación de la infraestructura de la presa de Coca Codo, señalando que potencialmente es menos costosa y plantea menos riesgos que las medidas de estabilización propuestas citadas arriba; el gerente de CELEC, Gonzalo Uquillas, en entrevista celebrada al noticiero 360 de Ecuavisa, el 24 de abril del 2022¹⁰⁰, señaló que esta recomendación estaría siendo considerada, ya que reconoció que en un “período de cinco años” la erosión podría llegar a las obras de captación. La iniciativa de CELEC de ralentizar el flujo del río con 11 contenedores llenos de concreto, a un costo de US\$ 890 000, no funcionó, el mismo que fue observado por Contraloría, entidad que concluyó que la obra contratada no tenía efecto en la contingencia de la emergencia ocurrida. Actualmente está en proceso la construcción de estas pantallas a unos

⁹⁸ Wagner J., Levish, D. & Greimann B. (2020) Review of Proposed Engineering Solutions for Rio Coca. U.S. Department of the Interior. October 2020 Ecuador

⁹⁹ Estudio internacional sugiere reubicar obras por la erosión. El Comercio 07 de diciembre de 2020. Quito. <https://www.elcomercio.com/actualidad/estudio-reubicacion-obras-erosion-coca.html>

¹⁰⁰ EL HAMBRE DE UN RIO YOUTUBE - VISIÓN 360 - 8VA TEMPORADA. <https://www.youtube.com/watch?v=wLy8AmEN77s>

dos km de la represa; sin embargo, varios profesionales han expresado reparos en cuanto a su viabilidad.

En diciembre del 2021, a consecuencia de la erosión del río Piedras Finas, colapsó la mesa de la vía E45 dejando incomunicado a la sierra norte con Sucumbíos. Ante esta realidad se han planteado alternativas para reestablecer la conexión vial. Dos propuestas están en la mesa de discusión:

- 1) Que el trazado vial se realice por la margen derecha del río Coca, por el sector conocido como “Alto Coca”, que tendría una longitud aproximada de 80 Km. Ya se encuentran habilitados 20 Km por una vía construida por CELEC, así como existe una vía de tercer orden de 15 Km. Los 45 kilómetros restantes implican una nueva construcción. El costo estimado para este proyecto vial es de US\$ 140 millones, y su tiempo de ejecución se ha calculado en 24 meses. Este trazado atravesaría el bosque protector La Cascada. El nuevo tramo se iniciaría desde Santa Rosa, en El Chaco (Napo), y concluiría en el poblado El Reventador, Gonzalo Pizarro (Sucumbíos).¹⁰¹ Un trazado por este sector implicará realizar un análisis de impacto ambiental muy detallado, por las particularidades paisajísticas, hídricas y de biodiversidad que existen en el sector, así como la localización de zonas de asentamientos humanos en vista de que existe la expectativa de que se asignen espacios para los pobladores de la comunidad de San Luis que resultarían afectados por el proceso erosivo (Ver. 5.3.3)
- 2) Se planea un trazado vial de 10 Km que se localizaría a unos 2 Km al noroccidente del actual, cercano al volcán El Reventador, atravesando el Parque Nacional Cayambe Coca. Este proyecto se ejecutaría en cuatro meses. Actualmente por iniciativa de la comunidad local (El Reventador y San Luis principalmente) están construyendo una variante que les permita movilizarse entre esos dos poblados, pero esta tiene mucho riesgo ya que no ofrece ni las garantías técnicas como tampoco la seguridad ya que está siendo trazada por las pendientes que está dejando al descubierto la erosión del río Coca. El 11 de abril se suscribió un convenio entre PETROECUADOR y el MOTP para construir dicha variante cuyo propósito es devolver la conectividad vial e impulsar la reactivación económica de Napo y Sucumbíos; el presupuesto asignado es de US\$ 25 millones¹⁰²; esta variante se la presenta como una solución temporal hasta la construcción de la definitiva de la carretera de 80 kilómetros, situada en la margen derecha de la actual y lo más distante del sitio de la socavación¹⁰³.

En cuanto a la infraestructura petrolera, el gerente de Petroecuador, Ítalo Cedeño, señaló que se está definiendo la variante definitiva del Sistema de Oleoducto Transecuatoriano (SOTE), el Oleoducto de Crudos Pesados (OCP), el Poliducto Shushufindi-Quito. Destacó que existen puntos vulnerables en el actual trazado de los ductos y que es necesario buscar la solución definitiva. De su parte, el Ministro de Energía, en una comparecencia en la Asamblea Nacional, señaló se propone construir una variante definitiva por la margen derecha del río Coca, a un costo de US\$ 200 millones¹⁰⁴; los ductos irían paralelos a la E45.

La rotura del oleoducto que ocurrió en diciembre del 2021 por la erosión del río Piedras Finas, obligó a suspender el bombeo de hidrocarburos por cerca de 20 días. Durante todo ese tiempo, Petroecuador construyó una nueva variante. La afectación económica para el país fue

¹⁰¹ Margen derecha del río Coca, la alternativa. Lucía Vásconez. El Comercio 20 enero 2022. <https://www.elcomercio.com/actualidad/ecuador/margen-derecha-rio-coca-alternativa.html>

¹⁰² USD 25 millones para devolver la conectividad a Napo y Sucumbíos. Tena, 7 de abril del 2022. <https://www.obraspublicas.gob.ec/usd-25-millones-para-devolver-la-conectividad-a-napo-y-sucumbios/>

¹⁰³ MOTOP y GAD Lago Agrio suscriben convenio para habilitar la vía Baeza – Lago Agrio. 2 de febrero de 2022. <https://www.obraspublicas.gob.ec/mtop-y-gad-lago-agrio-suscriben-convenio-para-habilitar-la-via-baeza-lago-agrio/>

¹⁰⁴ <https://www.primicias.ec/noticias/economia/erosion-variantes-sote-poliducto-ecuador/>

de más de alrededor de USD 500 millones. Esta corresponde la a novena variante que realizó la empresa petrolera estatal desde abril del 2020. Mientras que OCP realizó siete variantes (Ilustración 6).

En el último informe publicado que corresponde al Informe de Situación No. 67–SOCAVAMIENTO 18/02/2022¹⁰⁵, realiza un detalle de los eventos de mayor impacto que se suscitaron por la erosión regresiva:

- El 03/12/2021 la erosión regresiva alcanzó el sector de Piedra Fina y se evidenciaron nuevas grietas en la vía E45, en una afectación de aproximadamente 35 metros lineales en dicho sector. el 10/12/2021, aproximadamente a las 11am se registró la pérdida de la mesa vial en este sector, adicional el puente sobre el río Piedra Fina se encuentra en riesgo.
- El 04/11/2021 la erosión avanza por un nuevo frente, en el sector de la familia Puruncajas de la comunidad de San Luis, además los moradores han sentido vibraciones.
- El 19/05/2021 el proceso de erosión regresiva en el río Quijos (Alto Coca) provocó el colapso del puente Ventana 2 que conduce a los túneles de la Hidroeléctrica Coca Codo Sinclair y hacia las fincas utilizadas para agricultura y ganadería en el sector de San Luis, además el avance del proceso afectó la tubería de captación de agua potable.
- El 18/05/2021 se registró la pérdida de 520 metros de vía en el km 64 - vía E45 y de la vivienda denominada Casa Rosada en San Luis.
- El 20/04/2021 MTOP reporta la pérdida de 80 metros de vía en el km 64 - vía E45, en el sector de San Luis
- El 10/03/2021 la inestabilidad del talud cerca del poblado de San Luis afectó a uno de los tanques que abastece de agua al sector
- El 27/02/2021 se evacuaron a 2 familias (10 personas) hacia la Escuela 12 de febrero, las mismas que actualmente se encuentran arrendando en otros sitios
- El 23/02/2021 se produjo el derrumbe del arco por donde pasaba el río Coca (ex Cascada de San Rafael), provocando el represamiento total del río.
- El 18/02/2021 y 19/04/2021 se registraron inundaciones en el cantón Francisco de Orellana/San José de Guayusa/Las Minas de Huataraco.
- El 08/02/2021, en el cantón La Joya de los Sachas, el predio de la Unidad Educativa Comunitaria Intercultural Bilingüe Yacu Rumi es vulnerable a erosión fluvial. En la vía El Coca – La Joya de los Sachas [E45A] un socavamiento afecta a las bases del puente sobre el río Coca. Actualmente el acceso es parcial.
- El día 22/10/2020, colapso total del puente sobre el río Montana, ante este inminente colapso, el MTOP ejecutó una variante provisional de 650 metros de longitud en el Km 67.5, para mantener la conectividad entre las provincias de Pichincha, Napo y Sucumbíos, la cual estuvo habilitada y en operación desde el pasado mes de junio.
- El 22/08/2020 pérdida de aproximadamente 120m, red E45-km 66, sector "Y" de Baeza – Lago Agrio.
- El 04/06/2020 afectación de la vía E45 – tramo Km 67 - 66 en el sector San Rafael.
- El 07/04/2020 rotura de las 3 tuberías (SOTE, Poliducto Shushufindi- Quito y al OCP) para dar paso a una posterior contaminación de los ríos Coca y Napo.
- El 02/02/2020 colapso de la Cascada San Rafael

¹⁰⁵ Informes de Situación – Socavamiento – Napo/El Chaco/San Rafael, Km 105, vía Y de Baeza – Lago Agrio [E45]. <https://www.gestionderiesgos.gob.ec/informes-de-situacion-socavamiento-napo-el-chaco-san-rafael-km-105-via-y-de-baeza-lago-agrio-e45/>

8 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

8.1 Conclusiones

Como síntesis de todo el proceso y las decisiones que sobre la marcha han debido tomar las entidades nacionales, el colapso de la cascada San Rafael en el 2020 tomó por sorpresa a entidades del gobierno ecuatoriano. Las entidades responsables (Petroecuador, CELEC, MTOP, SGR, así como la empresa OCP), no dimensionaron la magnitud de las consecuencias que la erosión ocasionaría. El proceso erosivo, desde el momento que se conoció la desaparición de la cascada, fue rápido provocando severos impactos en obras de infraestructura, el comercio, turismo, centros poblados. La reacción de las instituciones frente al problema fue tardía y reactiva. Evidenció la limitada capacidad para establecer estrategias de mediano y largo plazo para enfrentar el problema. Las instituciones se tomaron demasiado tiempo -meses- para entender la gravedad del problema. A pesar de las alertas de parte de expertos, las autoridades competentes se concentraron en implementar medidas de protección que resultaron coyunturales como construir variantes que aseguren el flujo de petróleo, resolver el problema vial, impulsar iniciativas, fallidas, para ralentizar la erosión regresiva, atender los problemas derivados de la contaminación debido a los derrames, previsibles, de petróleo; o buscar respuesta a las comunidades afectadas directamente por la erosión como es el caso del poblado de San Luis. El problema está presente no obstante las acciones emprendidas. Las decisiones estratégicas se las está tomando con más de un año de retraso.

La desaparición de la cascada San Rafael, conforme a los análisis realizados, fue consecuencia del proceso natural de erosión generado tanto por la escorrentía superficial del río Coca como por la acción de las aguas subterráneas. Las evidencias de este tipo de proceso estaban reflejadas en la base de la cascada, en la cueva que se había formado a lo largo de los años; los indicios en superficie se observan en imágenes satelitales tomadas en los primeros meses del 2019, en ellas se aprecia la presencia de una incipiente depresión, evidencia de un sumidero, en el sitio de contacto entre los sedimentos / materiales acumulados aguas arriba del río y el flujo de lava que se constituyó como un dique que impidió la circulación del agua.

La construcción de la planta hidroeléctrica de Coca Codo Sinclair, específicamente represa de toma, no evidencia que haya incidido en el proceso erosivo. Por dos motivos 1) la represa inició operaciones en noviembre del 2016, la evidencia en superficie acontece en los primeros meses del 2019, por lo que no se pudiese atribuir que retención de sedimentos hayan ocasionado o acelerado la formación del sumidero; 2) si bien por efecto del funcionamiento de la toma se reportaron que se liberaba cada cierto tiempo un volumen importante de agua – no muy diferente del que discurre en épocas de una relativa media - alta pluviosidad-, no es menos cierto que por la captación para el funcionamiento de las turbinas se reduce el caudal, por lo que los menores caudales del río, ralentizan la capacidad erosiva del mismo. La liberación de volúmenes de agua luego de abrir las compuertas debe ser visto como un riesgo para comunidades asentadas en la cuenca baja y los potenciales efectos que pudiesen tener en la biodiversidad.

El flujo de lava que formó la cascada se asentó sobre brechas del Reventador, así como sobre materiales de la Avalancha 2 (AVL2) resultado de la desaparición del paleo Reventador y la formación del anfiteatro que rodea al actual volcán. Una vez que se activó la cascada, se inició el proceso erosivo del flujo de lava y, consecuentemente, de la base del mismo, con el transcurso de los años se fue agrandando la cueva en cuyo proceso participaron las aguas subterráneas que se infiltraban a través del contacto sedimento / lava, y por las aguas subterráneas originadas en las pendientes del volcán.

Las aguas subterráneas son las principales responsables de la erosión de los materiales sedimentarios / avalanchas / brechas sobre los que se depositó el flujo de lava, mientras que la energía hídrica derivada de la caída provocaba el retroceso del frente de la cascada. La acción de las aguas subterráneas se visualizó en superficie a inicios del 2019 (imágenes satelitales), la depresión que formaba el sumidero se fue agrandando con el transcurso del tiempo.

La margen izquierda del río Coca en donde se localizan las principales obras de infraestructura (SOTE, OCP, Poliducto, Asentamientos humanos (San Luis, San Carlos), tendidos eléctricos, etc.) es la más inestable y estuvo y está en mayor riesgo por el actual proceso erosivo, además es la más expuesta a los riesgos asociados al proceso eruptivo del volcán Reventador.

La erosión del terreno en el tramo entre lo que fue la cascada de San Rafael y la estación de bombeo El Salado, de continuar la tendencia actual, en un futuro próximo, provocaría la destrucción en algunos tramos no solo del SOTE, sino también del OCP y la E45, la represa de captación de aguas del proyecto CCS, y los asentamientos humanos como el de San Luis.

De mantenerse la intensidad del proceso erosivo, la infraestructura allí presente está en serio riesgo. Lo que obliga a replantear su localización, por lo que es necesario identificar nuevas alternativas para el tendido del sistema de oleoducto – poliducto, como para la captación de agua para el proyecto CCS; igual es imperioso diseñar una estrategia para relocalizar las poblaciones de San Luis, San Carlos y Piedras Finas.

Las obras de mitigación -que se construyen en el río Coca- con el propósito de ralentizar la erosión regresiva, en el mediano plazo, no evitarán las afectaciones a la infraestructura. El proceso erosivo continuará avanzando. Sobre este tema se han pronunciado varios profesionales y empresas especializadas.

En este contexto de no tomarse medidas urgentes que debieron haber sido asumidas desde el momento que desapareció la cascada, los costos para el país superarían los dos mil millones de dólares. Costos asociados con: la imposibilidad de movilizar el crudo de la Amazonía, con la obligada adquisición de crudo para el funcionamiento de las refinerías de Esmeraldas y la Libertad, por la necesidad de abastecerse de derivados de petróleo en el mercado internacional, por la paralización de generación eléctrica en el proyecto CCS, por los potenciales impactos ambientales aguas abajo debido a roturas del oleoducto, por la relocalización de asentamientos humanos, por los costos asociados con el transporte terrestre y la movilidad de productos y pasajeros ya que la N45 no podrá ser utilizada en este tramo, entre otros. A lo que es necesario agregar los costos asociados con la protección de los servicios de agua potable para las poblaciones asentadas aguas abajo de la cascada, para atender los cambios fluviales en el Coca y Napo a consecuencia de la acumulación de sedimentos, las inundaciones que acontecerán por el cambio de flujo de esos ríos.

Por los volúmenes de crudos que se transportan (el transporte diario de petróleo por el SOTE es de aproximadamente 78% de la producción nacional. De acontecer una paralización las pérdidas directas del presupuesto de Ecuador ascenderían al menos a 1.6 mil millones de dólares (estimados) durante el período de recuperación de SOTE.

Estos costes financieros reducirán inevitablemente la solvencia del país, incrementará el costo de uso de recursos financieros en los mercados internacionales de préstamos y también afectará seriamente la recuperación económica que permita enfrentar los efectos de la pandemia COVID-19.

El proceso de erosión regresiva del río Coca generó varias afectaciones aguas arriba como erosión del suelo, ruptura de oleoductos, represamientos, deslizamientos, contaminación,

pérdida de infraestructuras y una incertidumbre con el futuro de la hidroeléctrica Coca Codo Sinclair. Sin embargo, aguas abajo también presentaron varios eventos que afectaron a los poblados y comunidades cercanas a las riberas del río, entre ellas se evidenció acumulación de sedimentos, inundaciones, erosión del suelo, pérdida de infraestructuras y zonas de cultivo, a lo que se suma la contaminación por los derrames petroleros. Los sedimentos transportados están entre los 115 y 155M de metros cúbicos de ellos, en el segmento del río entre la que fue la cascada y el Paso Histórico, estaría depositado entre 55 y 65M m³; entre el Paso y el inicio de la planicie amazónica estarían depositados entre 35 y 45Mde m³.

Si bien la erosión “se ha detenido” en la confluencia del río Malo con el Coca por la presencia de la formación Misahuallí, brechas del Reventador Basal (BRB) y, probablemente por la presencia de flujos de lava de El Reventador, no significa que no continúe el proceso y pudiese poner en riesgo la presa de captación. El comportamiento del río ha demostrado que el proceso erosivo se dinamiza con los picos de caudales en épocas de lluvia. La temporada de lluvias que ya se inició (2022) pudiese incidir en las obras que se están realizando a 2 km aguas abajo de la presa, con las que se pretende ralentizar la energía erosiva del río.

La erosión en la cuenca alta del río Coca no solo acontece a lo largo de este río. Los afluentes que drenan en este río, entre la confluencia del río Quijos con el Salado y el sitio en el que se encontraba la cascada de San Rafael, procedentes de las dos márgenes también evidencia procesos de erosión aguas arriba. De entre ellos, los que drenan en la margen izquierda, en especial los ríos Marker, Piedra Fina, Loco y Malo, sobre los que pasa infraestructura vial y petrolera, están siendo afectados por este proceso. En el río Piedras Finas la erosión provocó la ruptura de los oleoductos y poliducto, así como dañó severamente la E45. En los otros tres (Marker, Loco y Malo), si bien el proceso no ha sido tan acelerado, no significa que no se deba vigilar su comportamiento. Como tampoco se debe desestimar el comportamiento del río Reventador.

El comportamiento del río Coca desde el inicio de la planicie aluvial amazónica hasta la confluencia con el río Napo, estará incidido por la carga de sedimentos que transporta y por los volúmenes de agua. Se activarán antiguos cauces, como ya acontece en las Minas de Huataroco y Toyuca, así como se acelerarán procesos erosivos de las márgenes. Varias áreas se inundarán. Esta dinámica fluvial será la constante de los próximos años, más aún que mientras no se estabilicen las pendientes en la zona de la erosión continuará el aporte de sedimentos y con ello el régimen fluvial aguas abajo tendrá variaciones.

En el río Napo, en el sector de Amaran Mesa, en la margen izquierda, el proceso erosivo de las orillas se acentuará. En esta zona, desde 1985, el río ya ha afectado aproximadamente 320 ha. que evidencia el cambio permanente del curso del río. En la margen derecha, al frente de Amaran Mesa, el río ha abandonado el cauce, actualmente este lugar, 150 ha. exhibe una abundante cobertura vegetal.

Lo acontecido con la cascada de San Rafael y las consecuencias de la erosión deja una dura lección al momento de tomar decisiones de proyectos hidroeléctricos. Es importante entender que las obras hidráulicas tienen impactos complejos y que muchas veces estas inversiones generan más costos a futuro, costos que superan por mucho a los beneficios. El proyecto CCS no es un caso aislado, en Ecuador existen innumerables obras de infraestructura hídrica que han ocasionado impactos significativos a los ecosistemas, medios de vida de las poblaciones y donde los costos reales superan a los beneficios.

8.2 Recomendaciones

Realizar un análisis socio-económico, con una proyección a 20 – 30 años, que evalúe los impactos del cambio morfológico que acontecerá en la zona, así como los riesgos a los que estarían expuestas la infraestructura que allí está presente.

Mantener un monitoreo permanente del comportamiento del proceso erosivo, en especial del proceso horizontal que afectaría el valle aguas arriba de lo que fue la actual cascada, ya que, de continuar, pondría en riesgo tanto al SOTE – OCP, la E45, la represa y a la población de San Luis. Los cambios morfológicos serán dramáticos en los próximos años.

Realizar un detallado levantamiento geológico, tomando como referencia el desarrollado por INECEL en 1988, para verificar la estructura geológica de todo el valle hasta la confluencia del Quijos y Salado, de tal suerte que se identifiquen los posibles escenarios que se pudiesen derivar del proceso erosivo y sus potenciales efectos en las obras de infraestructura y de asentamientos humanos. Los estudios deben incluir un análisis de la dinámica hidráulica fluvial, para determinar la incidencia de la pendiente longitudinal en la velocidad de flujo y el transporte de sedimentos.

Realizar un seguimiento y análisis de la incidencia de la carga de sedimentos que está arrastrando el río hacia aguas abajo y sus efectos potenciales en la navegación, pesca, cambio del cauce de los ríos Coca y Napo, así como la afectación a poblados asentados en las orillas de estos dos ríos.

Efectuar el seguimiento al proceso erosivo que está aconteciendo en el río Malo y en el Marker, ya que se incrementará el riesgo a la infraestructura vial y de oleoductos que atraviesan esos cauces.

El trazado vial que se proponga por la margen derecha del río Coca, dado que atravesará el Bosque Protector la Cascada, deberá contar con un muy exigente análisis de impacto ambiental dado que esta zona posee una importante biodiversidad, paisajes e importantes recursos hídricos. El desarrollo de obras de infraestructura tanto vial como de asentamientos humanos (reasantamiento de los pobladores de San Luis) constituyen una oportunidad para que estas se diseñen de tal suerte que se minimice el potencial impacto ambiental.

9 Anexo 1: Cambio Morfológico de la Cascada San Rafael: Fotografías 1944 - 2022

Foto 14: Heinrich Goldschmid (1944).

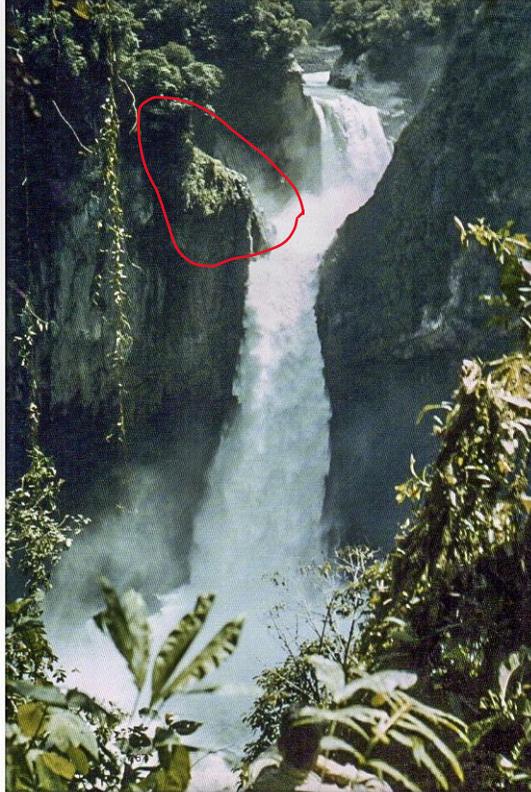


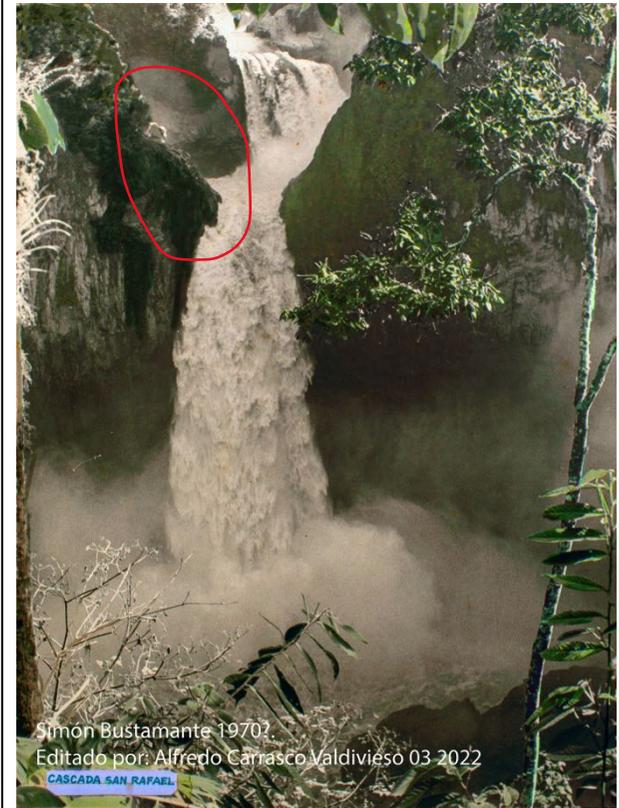
Foto: Heinrich Goldschmid. La caída del Coca. 1944.

Foto 15: Paul Schauenberg (1968)



FIG. 4. — Vue aérienne de la Chute de Goldschmid, sur le Rio Coca, Equateur. Hauteur totale de la chute: 120-150 m. (photo: P. Schauenberg).

Foto 16: Simón Bustamante (1970).



Simón Bustamante 1970?
Editado por: Alfredo Carrasco Valdivieso 03 2022
CASCADA SAN RAFAEL

Foto 17: Gottfried Hirtz (1976)



Gottfried Hirtz, 1976

Foto 18: Alfredo Carrasco Valdivieso (marzo 1987).



Sismo Reventador, marzo 1987.
Alfredo Carrasco Valdivieso

Foto 19: Susan Poats (1996).



Foto 20: Marcela García (2000)



Foto 21: Patricio Ramón (1 09 2003)



Foto 22: Alfredo Carrasco Valdivieso (16 03 2006)

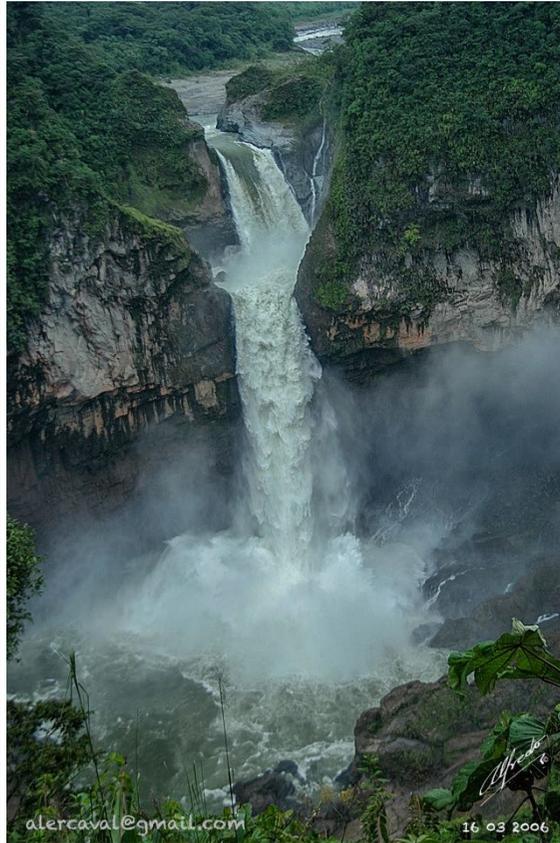


Foto 23: Juan Diego Pérez (2008)



Foto 24: Juan Carrasco Valdivieso (2013)

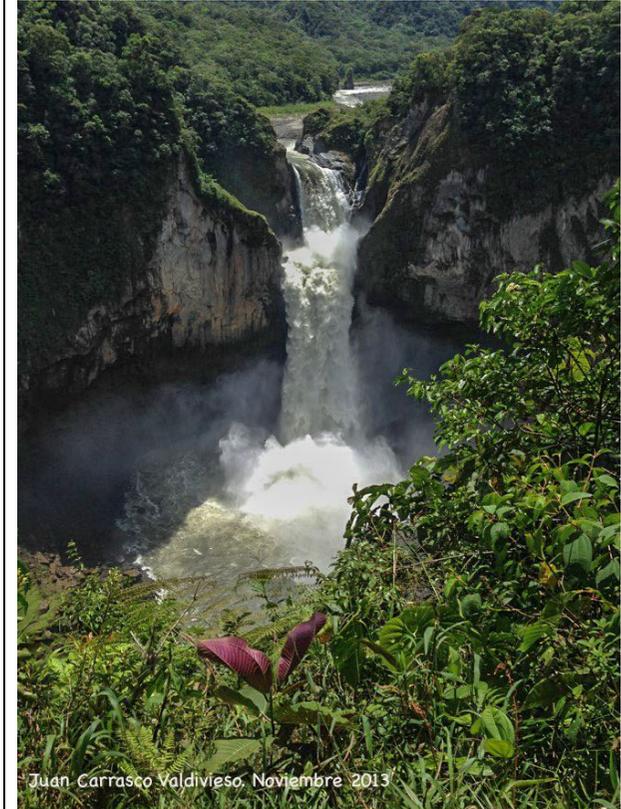


Foto 25: Eric Mohl (San Rafael Febrero 2014 – Septiembre 2015)



San Rafael Waterfall in February 2014 (left) and the same view in September 2015 (right).

Foto 26: Pancho IB - Noviembre 2017.

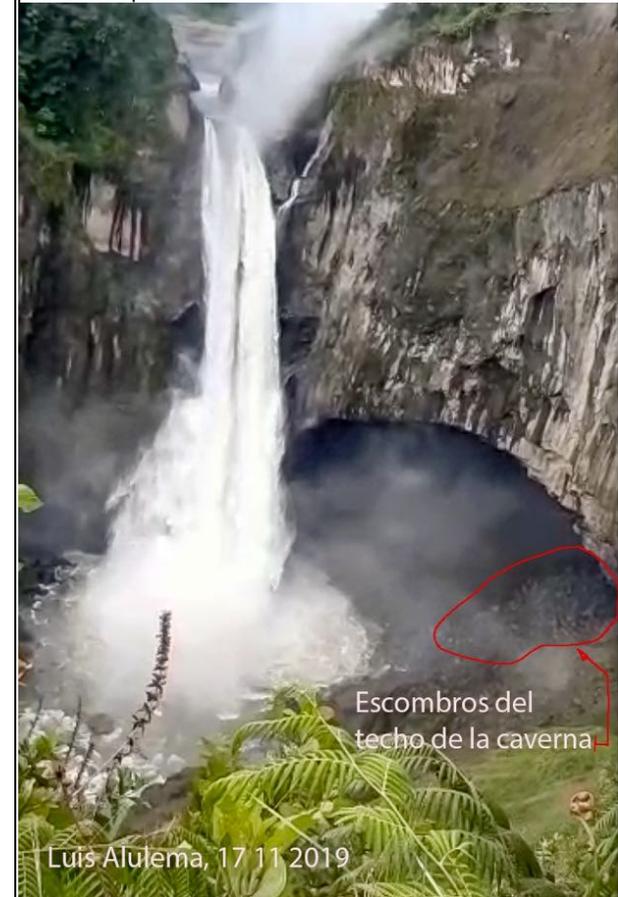


Foto 27: Patricio Ramón (13 11 2019): La "nube" que se observa corresponde a que el agujero que se formó (sumidero) está actuando como chimenea, arrastrando el vapor de agua que se produce por la caída de la cascada evidencia de que ya existía una conexión con la cueva de la base de la cascada.



San Rafael 13 09 2019. Patricio Ramón.

Foto 28: Luis Alulema (17 11 2019): En el costado inferior derecho de la cueva, se observa material desprendido del techo.



Escombros del
techo de la caverna

Luis Alulema, 17 11 2019

Foto 29: Foto video @boofsessions (02 2020 – publicado 08 05 2020)



Foto 30: Alfredo Carrasco Valdivieso (Mayo 2020)



Foto 31: Riesgos Ecuador @Riesgos_Ec (15 02 2021): colapso del arco.



Foto 32: Alfredo Carrasco Valdivieso (2022)



Alfredo Carrasco V. alercaval@gmail.com 03 02-22